Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LII, вып. 1, 1966 г.

УДК 622.271.4

ОПЫТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО УКРЕПЛЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ ТИХВИНСКОГО ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА

А. Г. Хуташвили, В. Н. Новожилов

В Тихвинском горнопромышленном районе при открытом способе ведения горных работ в бортах карьеров обнажаются преимущественно песчаные и глинистые породы карбона и покрывающие их четвертичные валунные суглинки [Новожилов, 1960].

На ряде карьеров района наблюдаются оползни бортов и породных уступов, реже их сплывы. В период снеготаяния или в результате выпадения атмосферных осадков толща четвертичных пород переувлажняется, резко снижается их несущая способность. Снижение несущей способности валунных суглинков отрицательно сказывается на условиях работы шагающих экскаваторов *: падает их маневренность, база экскаватора нередко погружается в грунт до 0,4—0,5 *м*, иногда несущая способность перемятого переувлажненного грунта оказывается недостаточной и экскаваторы без дополнительных мероприятий (осыпки песчаных и гравийно-галечных подушек, подмостки подтоварником и т. д.) вообще работать не могут.

Динамические воздействия шагающих экскаваторов на сильно переувлажненные грунты нередко являются причиной оползневых явлений вследствие тиксотропных превращений в глинистых грунтах [Гуменский, Новожилов, 1961; Новожилов, 1963].

В 1963—1965 гг. Ленинградским горным институтом на одном из карьеров Тихвинского глиноземного завода проведены полевые опытные работы с целью установления возможности: а) увеличения несущей способности валунных суглинков на рабочих площадках под шагающие экскаваторы посредством электроосмоса и электрохимических способов их укрепления; б) повышения прочностных показателей песчано-глинистых пород, обнаженных в бортах карьеров, как одного из мероприятий по борьбе с оползневыми явлениями на карьерах.

Большая помощь в организации этих работ была оказана начальником рудника инженером Г. К. Копаевым и главным геологом завода А. А. Кальниным.

Геологическое строение верхней части толщи вскрышных пород, подлежащих укреплению, представлено на геологической колонке рис. 1.

---

* На карьерах глиноземного завода работают экскаваторы ЭШ 4/40, ЭШ 10/60, ЭШ 6/60 и ЭШ 15/90.

К прослою михайловских известняков карбона приурочен водоносный горизонт с напором 3,5—3,8 *м* над кровлей известняков.

Физико-механические свойства пород типичны для всего месторождения в целом и характеризуются приведенными ниже средними данными.

Суглинки валунные. Окраска от светло-коричневой до темно-коричневой, в нижней части толщи более темная. В толще суглинков неравномерно рассеяны гравийно-галечные включения и валуны размером до 0,5 *м* в диаметре. Гравийно-галечная часть суглинков не превышает 5—6% от общего объема и представлена магматическими и осадочными известковыми породами. Сложение суглинков массивное, реже неяснослоистое. В верхней части толщи, на глубине до 5—6 *м* суглинки трещиноватые. Трещины шириной 0,3—0,8 *см*, длиной в обнажениях — до 5—6 *м*. Трещины расположены вертикально без определенной ориентировки и обычно заполнены светло-серым или зеленовато-желтым песчано-глинистым материалом. В ряде случаев они заполнены водой. При опробовании соляной кислотой суглинки слабо вскипают.

Под микроскопом структура суглинков обычно алевропелитовая, иногда псамито-алеврито-пелитовая; текстура массивная.

По гранулометрическому составу они относятся к средним суглинкам. Тонкозернистая часть их представлена гидромусковитом и каолинитом. Величина емкости поглощения суглинков не превышает 4—7 *мг-экв* на 100 *г* породы. Преобладающая часть поглощенных оснований представлена ионами Ca и Mg.

Естественная консистенция обычно пластичная, суглинки находятся в водонасыщенном состоянии.

Основные физико-механические свойства валунных суглинков (см. таблицу) позволяют отнести их по прочностным показателям к породам сравнительно слабым.

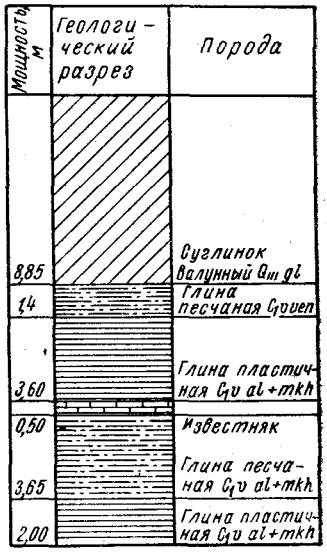


Рис. 1. Геологическая колонка скважины на участке опытных работ Подсосненского карьера.

Как показали испытания на водоустойчивость, образцы суглинков размером 5×5×5 *см* в воде размокают в течение нескольких десятков часов и до 5—10 суток. Величина набухания суглинков не выходит за пределы 8—10%. Коэффициент фильтрации монолитных нетрещиноватых разностей, по данным лабораторных испытаний, изменяется от $9{,}3 \cdot 10^{-8}$ до $1{,}1 \cdot 10^{-8}$ *см/сек*.

Глины песчаные веневского горизонта. Окраска светло- и темно-коричневая. Сложение массивное, иногда тонко- и толстослоистое. Под микроскопом структура глин обычно алевропелитовая, реже сидеронитовая и микролепидолитовая; текстура массивная, реже полосчатая. По физическому состоянию глины характеризуются пластичной и тугопластичной консистенцией; видимой трещиноватости в откосах уступов не наблюдается. При опробовании соляной кислотой они вскипают.

По гранулометрическому составу эти породы относятся к суглинкам, иногда существенно пылеватым. Тонкодисперсная часть их представлена гидромусковитом и каолинитом. В отдельных пробах отмечено повышенное содержание кварца (до 35%) и кальцита (до 20%).

По физико-механическим свойствам веневские песчаные глины близки к валунным суглинкам (см. таблицу).

Основные показатели физико-механических свойств глинистых пород (среднеарифметические данные)

Порода	Гранулометрический состав, %			Удельный вес, г/см³	Объемный вес, г/см³	Объемный вес снегета, г/см³	Пористость, %	Коэффициент пористости, %	Влажность, %	Пределы пластичности, %	Пределы текучести, %	Число пластичности	Коэффициент насыщения	Степень естественной увлажненности (по В. А. Приклонскому)	Сцепление, кГ/см²	Угол внутреннего трения
	< 0,002 мм	0,002—0,05 мм	> 0,05 мм													
Суглинок валунный $Q_{III}gl$ (19 определений)	16	25	59	2,72	2,16	1,86	31	0,45	16	13	23	10	0,95	0,2—1,1	0,270	23°
Глина песчаная C_1vve (5 определений)	19	37	42	2,74	2,19	1,90	31	0,45	14,5	14	28	14	0,94	0,3—0,9	0,340	21° 20′
Глина пластичная $C_1val + mkh$ (10 определений)	38	46	8	2,73	2,12	1,80	34	0,53	18	19	37	19	0,93	0,3—1,3	0,300	20° 35′
Глина песчаная $C_1val + mkh$ (12 определений)	32	48	20	2,72	2,15	1,86	32	0,47	15	17	30	15	0,93	0,3—1,2	0,200	29°

Глины пластичные и песчаные алексинско-михайловского горизонта. Глины пластичные окрашены от светло-серых до темно-красных тонов, нередко пятнистые, реже полосчатые. Сложение их слоистое, иногда массивное. Структура глин под микроскопом пелитовая, алевритовая и алевропелитовая, текстура массивная, реже пятнистая и полосчатая. Консистенция глин пластичная, реже тугопластичная до полутвердой.

Глины песчаные окрашены в серый, коричневый и бурый с красным оттенком цвета. Сложение их обычно грубослоистое, реже тонкослоистое и массивное. Структура их под микроскопом алевропелитовая и пелито-алевритовая, текстура массивная, реже пятнистая или слоисто-полосчатая.

По гранулометрическому составу песчаные глины более неоднородны, чем пластичные. Пластичные глины по составу относятся к глинистым разностям, хотя около 20% их представлено тяжелыми суглинками. Обе разности глин пылеватые.

Минеральный состав тонкодисперсных фракций глин этого горизонта представлен преимущественно каолинитом (>50%) и гидромусковитом (<50%), при резко подчиненном содержании кварца и кальцита.

Основные физико-механические свойства глин алексинско-михайловского горизонта (см. таблицу) существенно не отличаются от пород района в целом [Новожилов, 1962, 1965]. Для обеих разностей глин отмечается большой разброс между минимальными и максимальными значениями

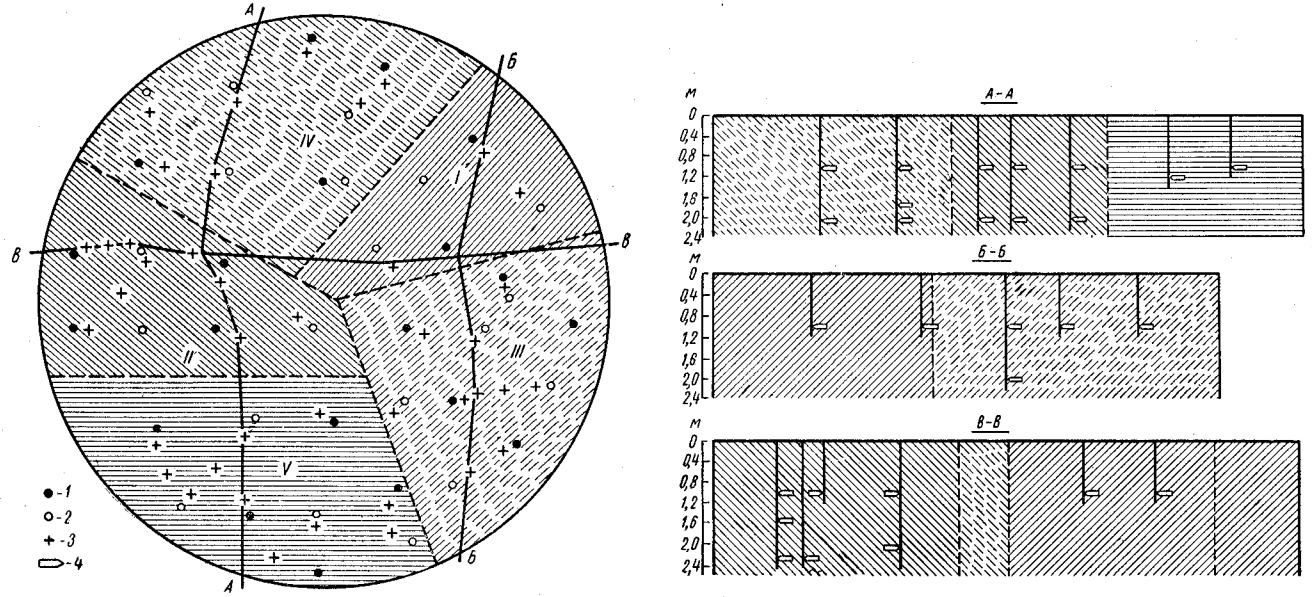


Рис. 2. План расположения электродов-иньекторов на первой площадке.

Участки: *I* — электроосмотического осушения; электрохимического укрепления с введением в породу: *II* — хлористого кальция; *III* — силиката натрия; *IV* — мочевино-формальдегидной смолы; *V* — хлористого кальция и силиката натрия.
Иньектор: *1* — катод; *2* — анод; *3* — буровая скважина; *4* — место отбора проб грунта.

угла внутреннего трения и сцепления, что свидетельствует о значительной изменчивости их свойств. На контактах с водоносными песками и известняками, а также в зонах ледниковых нарушений, прочностные показатели всех глинистых пород карбона этого месторождения значительно ниже, чем внутри недислоцированных слоев и удаленных от контактов с водовмещающими породами.

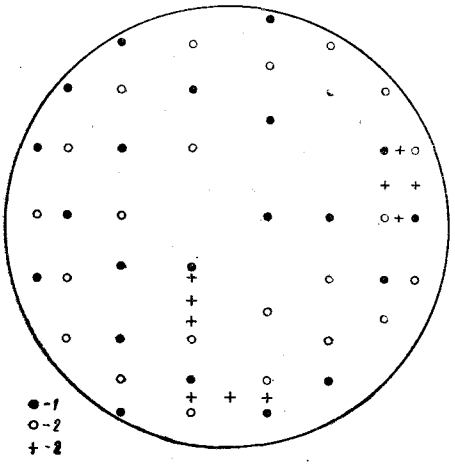


Рис. 3. План расположения электродов-иньекторов на второй площадке.
Иньектор: *1* — катод; *2* — анод; *3* — буровая скважина.

Скорость размокания песчаных разностей длится от нескольких часов до нескольких суток; наиболее быстро размокают слоистые разности глин. Набухание для пластичных разностей равно 25%, а для песчаных разностей — 34% (максимальные значения).

Полевое опытное электроосмотическое осушение и электрохимическое укрепление глинистых пород проводили на трех площадках, расположенных на борту действующего карьера. На первых двух площадках (рис. 2 и 3), имеющих в плане форму круга диаметром 10 *м*, валунные суглинки укрепляли с целью повышения несущей способности применительно к работе экскаватора ЭШ 6/60. На третьей площадке (рис. 4), размером в плане 3×16 *м*, укреплением повышали прочностные показатели четвертичных валунных суглинков и глинистых пород карбонового возраста (см. рис. 1) с целью усиления устойчивости первого уступа борта карьера. Первая и третья площадки располагались на берме борта около верхней бровки карьера, вторая площадка — в 80 *м* от первой, на участке стоянки экскаватора при перелопачивании отвалов вскрышных пород.

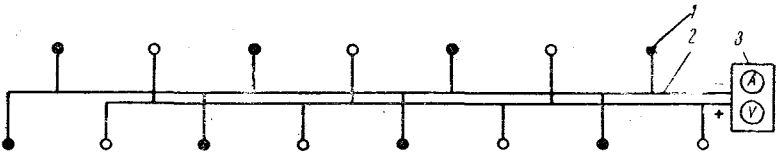


Рис. 4. План расположения электродов-иньекторов и схема подачи электрического тока на третьей площадке:
1 — иньектор; *2* — кабель; *3* — генератор.

На первой площадке (рис. 2) было пробурено 38 скважин глубиной от 2 до 2,5 *м*, диаметром 70 *мм*. В каждую скважину помещали электроды-иньекторы, изготовленные из обычных буровых труб (рис. 5). Расстояние между иньектором-катодом и иньектором-анодом 1,5—2 *м*. На площадке, разделенной на 5 опытных участков, опробовали различные способы укрепления пород: 1 — воздействием электроосмоса на валунные суглинки без введения закрепляющих веществ; 2 — электрическим током с введением в породу хлористого кальция; 3 — электрическим током с введением силиката натрия; 4 — электрическим током с введением мочевино-формальдегидной смолы (МФ-17); 5 — электрическим током с введением хлористого кальция и силиката натрия.

Вторая площадка, где было пробурено 48 скважин глубиной 2,5 *м*, оборудована такими же электродами-иньекторами как и первая (расстояние между иньекторами в каждой паре 1,5—2 *м*). Валунные суглинки укрепляли электрическим током с введением в породу хлористого кальция, а на участке четырех пар иньекторов иньецировалось жидкое стекло.

На третьей площадке глинистые породы укрепляли электрическим током с введением хлористого кальция. Всего было пробурено 15 скважин, глубиной 18—22 *м*. В скважины опускали электроды-иньекторы из перфорированных труб диаметром 78 *мм*. Расстояние между иньекторами составляло от 1 до 2 *м*. Схема расположения иньекторов приведена на рис. 4. К электродам подавали постоянный электрический ток напряжением 90—100 *в* от мотор-генератора ПН-100, что обеспечивало создание градиента напряжения между ними порядка 0,3—0,6 *в/см* (рис. 4, 6 и 7).

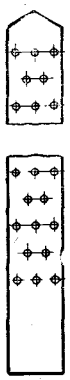


Рис. 5. Схема иньектора.

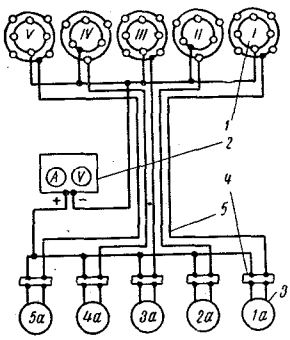


Рис. 6. Схема подачи электрического тока на первую площадку:
1 — опытный участок; *2* — генератор; *3* — амперметр; *4* — шунт; *5* — кабель.

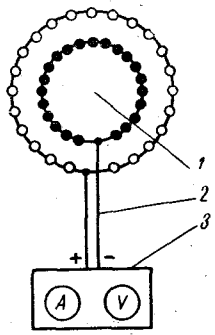


Рис. 7. Схема подачи электрического тока на вторую площадку:
1 — опытный участок; *2* — кабель; *3* — генератор.

Опытное укрепление пород на каждой площадке продолжали в течение 25—30 дней. Электрический ток подавали к иньекторам непрерывно. Закрепляющие породу растворы вводили строго определенными порциями. Воду, поступавшую в иньекторы-катоды, систематически откачивали насосом и сбрасывали за пределы площадок *. После введения последней порции закрепляющего раствора, в течение 6—7 суток продолжали подачу электрического тока для электроосмотического осушения укрепленного массива.

По окончании работ на первой и второй площадках пройдены контрольные шурфы и пробурена сеть скважин для установления зон укрепленных пород, из которых отобраны пробы грунтов. Буровые скважины диаметром 146 *мм* расположены во всех трех зонах: катодной, анодной и на половине расстояния между катодом и анодом. Пробы закрепленных пород изучались по специальной программе и методике в лаборатории [Хуталшвили, 1965].

В результате проведенных работ получены следующие результаты.

На опытном участке *I* первой площадки (см. рис. 2) при электроосмотическом осушении толщи влажность валунных суглинков понизилась, водоустойчивые и прочностные показатели несколько повысились.

---

* На третьей площадке воду из иньекторов не откачивали.

Влажность суглинков в анодной зоне не превышала 10%, а в катодной — 12%. В обеих зонах на несколько процентов снизилась влажность на границе текучести. Кубики размером 5×5×5 *см* не размокали в воде в течение 5—6 суток.

В катодной зоне временное сопротивление сжатию возросло до 3,5—4 *кГ/см²*, в анодной достигло 2 *кГ/см²*. Повысились показатели сопротивления сдвигу: величина сцепления с 0,25—0,30 до 0,55 *кГ/см²*, а угол внутреннего трения — с 21—24 до 27—28°.

Прочностные показатели суглинков существенно возросли в соответствии со снижением влажности (до 10—12%). Так, грунты тугопластичной консистенции, как правило, редко обладают тиксотропными свойствами. Такое снижение влажности существенно важно при работе шагающих экскаваторов, создающих переменные по величине и знаку динамические нагрузки. Затраты электроэнергии при этом способе осушения валунных суглинков составили 9 *квт·ч* на 1 *м³* породы. Осушение проводили в течение 13 суток. Сила тока в начале опыта была 10—12 *а*, в конце — 3—5 *а*.

На опытном участке *II* первой площадки проведено электрохимическое укрепление валунных суглинков с применением хлористого кальция. 10-процентный раствор хлористого кальция подавали в иньекторы-аноды. На 18-й день расход раствора резко снизился, и как свидетельство окончания процесса сила тока уменьшилась с 15—20 до 5 *а*.

Водные и физико-механические свойства валунных суглинков после закрепления претерпели значительные изменения. Влажность в обеих зонах снизилась до 10—12%, суглинки не размокали в воде более 10—15 суток. Более водоустойчивыми оказались образцы, отобранные из катодной зоны. Объемный вес скелета породы возрос до 1,9—2,0 *г/см³*, а пористость снизилась до 26—28%. Временное сопротивление сжатию в катодных зонах составило 10—11 *кГ/см²*, в анодных — 3—4 *кГ/см²*. Угол внутреннего трения увеличился в анодной зоне до 30—35°, в катодной — незначительно. Сцепление породы возросло несущественно.

Для закрепления 1 *м³* суглинков на этом участке израсходовано 30—40 *квт·ч* электроэнергии и 5,5—6 *кг* порошкообразного хлористого кальция.

На опытном участке *III* первой площадки испытан электрохимический способ укрепления валунных суглинков с применением раствора силиката натрия удельного веса 1,15. Спустя 10 дней после начала опыта направление движения электрического тока было изменено, и раствор силиката натрия заливали в противоположные электроды с последующим осушением. Сила тока, равная в начале опыта 25 *а*, в конце была снижена до 5—7 *а*.

Физико-механические свойства укрепленных суглинков в катодной и в анодной зонах примерно одинаковы. Временное сопротивление сжатию достигло 9—11 *кГ/см²*. Угол внутреннего трения возрос до 34—37°, а сцепление осталось примерно тем же, что и до закрепления.

Для обработки 1 *м³* суглинков затрачено 40 *квт·ч* электроэнергии и около 12 *кг* жидкого стекла удельного веса 1,5 и модуля 2,5.

На опытном участке *IV* первой площадки электрохимическое укрепление валунных суглинков проводили с иньецированием мочевино-формальдегидной смолы концентрации 1 : 5. Сила тока в начале опыта 20—25 *а*, в конце 10—15 *а*.

Существенного улучшения водных и физико-механических свойств валунных суглинков на этом опытном участке не получено. Временное сопротивление сжатию в анодной зоне возросло лишь до 3—5 *кГ/см²*, а водоустойчивость осталась примерно прежней.

На закрепление 1 $м^3$ породы этим способом затрачено 38 *квт·ч* электроэнергии и около 5 *кг* водного раствора карбомидной смолы с сухим остатком 70%.

На опытном участке *V* первой площадки испытан электрохимический способ укрепления с введением в суглинки двух химических реагентов — растворов жидкого стекла и хлористого кальция. Раствор жидкого стекла удельного веса 1,15 вводили через иньекторы в течение 12 дней, затем в течение 10 дней — 10-процентный раствор хлористого кальция. Электрический ток к иньекторам-электродам подавали непрерывно. Сила тока в начале опыта 20—25 *а*, в конце — 5—10 *а*.

Физико-механические свойства суглинков анодных зон существенно выше, чем катодных: временное сопротивление сжатию образцов в первом случае достигает 11—12 $кГ/см^2$, во втором не превышает 3—4 $кГ/см^2$. Образцы, отобранные из анодной зоны, не размокали в воде в течение 15—20 суток, из катодных — размокали за 4—5 суток. Сцепление суглинков в анодной зоне возросло до 0,5—0,6 $кГ/см^2$, в катодной зоне осталось без изменения.

Для обработки 1 $м^3$ породы израсходовано около 36 *квт·ч* электроэнергии и 9 *кг* растворов жидкого стекла удельного веса 1,5 и 3 *кг* хлористого кальция.

На второй площадке опытное электрохимическое укрепление валунных суглинков проводили с иньекцией 10-процентного раствора хлористого кальция и на небольшом участке — с иньекцией раствора жидкого стекла (с удельным весом 1,13). Целью работ была проверка технологии закрепления и параметров подаваемой к электродам электроэнергии. Вторая площадка в качестве рабочей предназначалась для стоянки экскаватора ЭШ 6/60. Но план работ изменился и экскаватор на этом участке начал перелопачивание породы более чем через 6 месяцев. За это время укрепленный грунт промерз, а затем оттаял.

Лабораторными исследованиями укрепленных суглинков получены данные, близкие к результатам опытных участков *II* и *III* первой площадки. Так, при обработке породы хлористым кальцием влажность породы уменьшилась до 10% в анодных зонах и до 12% в катодных. Временное сопротивление сжатию в катодных зонах возросло до 9,5 $кГ/см^2$ и в анодных — до 4 $кГ/см^2$.

На укрепление 1 $м^3$ породы израсходовано 35 *квт·ч* электроэнергии, 6,5 *кг* хлористого кальция и 11 *кг* жидкого стекла.

На третьей площадке осуществляли глубинное укрепление глинистых пород. Закрепляли массив пород на глубину 18—22 *м*. Опыт длился 30 дней. К иньекторам-анодам подавали 10%-ный раствор хлористого кальция. Сила тока 60—100 *а*.

Расход электроэнергии на обработку 1 $м^3$ глин составил 25—30 *квт·ч*, хлористого кальция — 3 *кг*. Пробы закрепленных пород не отбирали.

Выводы

1. Опытные работы на Подсосненском карьере Тихвинского глиноземного завода в производственных условиях подтвердили данные лабораторных экспериментов о возможности электроосмотического и электрохимического способов укрепления глинистых пород.

2. Применительно к работе шагающих экскаваторов с целью усиления несущей способности пород целесообразно электроосмотическое осушение, которое в необходимой степени повышает прочностные показатели валунных суглинков.

3. Лучшими укрепляющими растворами глинистых пород при электрохимическом способе являются хлористый кальций и жидкое стекло. Мочевино-формальдегидная смола не дает нужного эффекта повышения прочности породы.

4. В весенний и осенний периоды года на отдельных участках переувлажнения верхней приповерхностной толщи валунных суглинков, куда затруднена доставка песчано-гравийных материалов, для создания подушек под шагающие экскаваторы и для обеспечения производства горных работ — целесообразно глинистые породы укреплять посредством электроосмоса или электрохимическим способом с применением хлористого кальция. Для этого необходим мобильный агрегат, совмещающий буровые операции, иньекцию растворов и подачу электрического тока.

5. Целесообразность применения глубинного закрепления глинистых пород на оползневых участках карьеров Тихвинского глиноземного завода необходимо подтвердить данными полевых наблюдений и соответствующими расчетами.

Дальнейшее развитие открытых горных работ несомненно потребует от инженеров-геологов и горных инженеров расширения области применения методов искусственного улучшения прочностных свойств горных пород; пока же эти методы применяются неоправданно редко.

ЛИТЕРАТУРА

Гуменский Б. М., Новожилов Г. Ф. Тиксотропия грунтов и ее учет при строительстве автомобильных дорог и мостов. Автотрансиздат, 1961.

Новожилов В. Н. Оползни на рудниках Тихвинского глиноземного завода. В сб. Вопросы инж. геол. Ленинградского экон. р-на, ЦБТИ, 1960.

Новожилов В. Н. Физико-механические свойства вскрышных пород месторождения тихвинских бокситов. Зап. ЛГИ, т. XLIV, вып. 2, 1962.

Новожилов В. Н. Оценка устойчивости бортов карьеров при разработке тихвинских бокситовых месторождений. Зап. ЛГИ, т. XLVIII, вып. 1, 1963.

Новожилов В. Н. Инженерно-геологическая характеристика нижнекаменноугольных пород центральной части Тихвинского горнопромышленного района. Зап. ЛГИ, т. XLVIII, вып. 2, 1965.

Хуташвили А. Г. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств искусственного укрепленных слабых глинистых пород (на примере электрохимического закрепления). В сб. докл. конференции по методике лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. Изд. НТО Горное и ЛГИ, 1965.