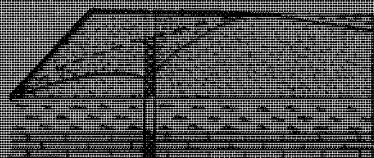
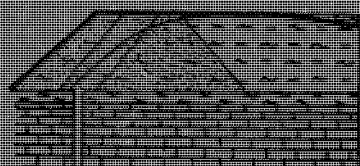


А.М. ГАЛЬПЕРИН

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ



А.М. ГАЛЬПЕРИН

**УПРАВЛЕНИЕ
СОСТОЯНИЕМ
НАМЫВНЫХ
МАССИВОВ
НА ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ**



МОСКВА "НЕДРА" 1988

Гальперин А.М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. — М.: Недра, 1988. — 199 с.; ил. — ISBN 5—247—00137—0

Изложены теоретические и прикладные аспекты управления состоянием массивов намывных горнотехнических сооружений с целью обеспечения безопасности и эффективности их возведения, охраны земельных и водных ресурсов. Рассмотрены технологические схемы формирования гидроотвалов и хвостохранилищ, отмечены особенности возведения намывных сооружений в зависимости от их целевого назначения, методы определения их параметров. Описана аппаратура, применяемая при геомеханическом контроле намывных массивов. Даны рекомендации по выбору рациональных мероприятий, определению затрат и продолжительности проведения рекультивационных работ.

Для работников научно-исследовательских и проектных институтов горнодобывающей и химической промышленности.

Табл. 22, ил. — 64, список лит. — 50 назв.

Рецензент д-р техн. наук *М.Е. Певзнер*

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986–1990 годы и на период до 2000 года в нашей стране осуществляется комплекс мер по охране природы — развиваются комбинированные производства, исключаящие или существенно снижающие вредное воздействие на окружающую среду, улучшается охрана водных ресурсов, совершенствуются технологические процессы для усиления охраны атмосферного воздуха.

Принятие основных проектных решений по созданию территориально-производственных комплексов в горнопромышленных районах невозможно без разработки действенных мер по снижению отрицательного влияния производственных процессов на окружающий ландшафт, водный и воздушный бассейны, сельскохозяйственное производство.

Высокие темпы развития наиболее эффективного открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых при значительном снижении затрат на их освоение во многих горнопромышленных районах могут быть достигнуты за счет расширения сферы применения гидравлического способа разработки, транспортировки и складирования вскрышных пород. Складирование отходов (хвостов) обогащения полезных ископаемых и золошлаков тепловых электростанций осуществляется только гидравлическим способом. В намывные горнотехнические сооружения — гидроотвалы и хвостохранилища — ежегодно укладывается около 0,5 млрд. м³ вскрышных пород и отходов обогащения полезных ископаемых.

Однако при возведении гидроотвалов и хвостохранилищ острота природоохранных проблем возрастает, так как используются значительные водные и земельные ресурсы, возникает опасность загрязнения водного и воздушного бассейна. Площадь этих сооружений лишь в двух крупнейших горнодобывающих районах — Курской магнитной аномалии (КМА) и Кузбассе, характеризующихся наличием мощного слоя чернозема, составляет около 10 тыс. га. Во внутренних (ядерных) зонах гидроотвалов и хвостохранилищ массивы намывных тонкодисперсных материалов при традиционной технологии намыва достигают высоты 50–100 м. Ядерные зоны в течение десятилетий находятся в неуплотненном состоянии, поэтому обладают низкой несущей способностью и остаются недоступными даже для машин в болотоходном исполнении, что исключает возможность дальнейшего народнохозяйственного использования этих намывных территорий. Водонасыщенные слабоуплотненные массивы при определенных условиях могут создавать угрозу затопления прилегающих площадей. Низкая плотность укладки горной массы приводит к высокой землеемкости гидроотвалов — до 8–10 га/млн. м³ складироваемого материала. Слабая водоотдача техногенных отложений гидроотвалов обуславливает медленный водооборот и потребности в значительных дополнительных объемах воды на подпитку гидроустановок.

Анализ теории и практики гидроотвалообразования позволяет сформулировать требования к созданию намывных горнотехнических сооружений многоцелевого назначения с достижением высокого природоохранного и экономического эффекта. Основные аспекты этой проблемы: рациональное использование земель на основе объединения гидроотвалов и хвостохранилищ в общих контурах намывных сооружений; геомеханическое обоснование мероприятий по форсированию консолидации и повышению несущей способности намывных массивов при совместной гидроукладке тонкодисперсных и раздельнозернистых пород; промышленное внедрение технологии формирования намывных массивов, обеспечивающей повышение вместимости и ускоренное восстановление территорий гидросооружений;

увеличение площадей, пригодных для сельского и лесного хозяйства, за счет использования намывных сооружений овражно-балочного типа для ликвидации последствий и предупреждения дальнейшего развития эрозионных процессов;

разработка и внедрение мероприятий по охране водных ресурсов за счет эффективного водооборота при намывных работах, пылеподавление в пределах упорных призм и внутренних зон намывных сооружений.

С учетом необходимости охраны земельных ресурсов горнопромышленных районов предусматриваются складирование в контурах намывных сооружений вскрышных пород и отходов обогащения полезных ископаемых и поэтапная рекультивация намывных территорий. Создание объединенных гидроотвально-хвостовых хозяйств наряду со значительным сокращением площади земельных отводов открывает также новые возможности решения задач форсирования консолидации тонкодисперсных грунтов и водооборота.

Отсутствие надежного геомеханического обоснования технологии формирования намывных горнотехнических сооружений приводит к аварийным ситуациям, проявляющимся в виде скоротечных и катастрофических деформаций намывных массивов. Аварии создают угрозу для жизни людей, приводят к заилению глинистыми или токсичными пульпами плодородных земель, загрязнению поверхностных и подземных вод.

Перспективным направлением повышения эффективности и безопасности возведения гидроотвалов и хвостохранилищ является управление состоянием намывных массивов как непрерывный процесс прогноза, контроля и целенаправленного изменения устойчивости откосных сооружений и интенсивности уплотнения (упрочнения) тонкодисперсных материалов внутренних зон.

Механико-математические модели намывных массивов базируются преимущественно на теориях фильтрационной консолидации и ползучести грунтов, предельного напряженного состояния и предельного равновесия сыпучей среды со сцеплением.

Для прогноза поведения во времени намывных толщ тонкодисперсных грунтов целесообразно использовать расчетные схемы уплотнения, соответствующие всем этапам формирования гидросооружений и учитываю-

щие также периоды после завершения намыва отдельных слоев и всего массива. Оценку длительной устойчивости упорных призм, тело или основание которых сложены глинистым материалом, а также сухих отвалов на намывных основаниях целесообразно выполнять с использованием расчетных методов структурной механики грунтов.

Для получения исходных расчетных характеристик следует отдавать предпочтение натурным наблюдениям. Решение обратных задач при интерпретации данных натурных экспериментов позволяет установить роль отдельных факторов, определить расчетные параметры и закономерности изучаемых процессов с наибольшим приближением к действительности.

Успешная реализация горно-технологических решений, обеспечивающих достижение максимального природоохранного эффекта, становится возможной при использовании комплекса методов наблюдений, позволяющих выполнять оперативную оценку устойчивости откосных сооружений, устанавливать границы зон намывного массива, определять механические свойства грунтов и несущую способность труднодоступных зон гидроотвала. Этим требованиям удовлетворяют методы натурных наблюдений, предусматривающие создание стационарной системы контроля избыточного порового и гидростатического давления в теле и основании упорных призм, использование зондов, обеспечивающих одновременное получение данных о величинах порового давления и сопротивления сдвигу водонасыщенных тонкодисперсных грунтов, а также проведение аэрофотосъемки намывных сооружений. Аэрометоды позволяют выполнять инженерно-геологическое районирование намывных территорий по фотосхемам, производить оценку состояния откосов упорных призм и определять осадки намывных массивов с использованием метода аналитической фототриангуляции.

Инженерно-геологическое районирование намывных сооружений должно выполняться с учетом несущей способности массива и направлений дальнейшего использования территорий гидроотвалов. Методика оценки несущей способности намывных массивов должна предусматривать определение: допустимых внешних нагрузок — по степени уплотнения тонкодисперсных толщ; потребной для уплотнения (упрочнения) продолжительности "отдыха" массива — по заданной величине внешней нагрузки.

Для крупных гидроотвалов с высокой интенсивностью намыва повышение плотности укладки складировемого материала и начало рекультивационных работ одновременно с достижением проектных отметок заполнения сооружений можно обеспечить путем управления свойствами и состоянием намывных толщ в ходе их формирования за счет совместного намыва грунтов различной водопроницаемости.

Для целенаправленного технологического воздействия на тонкодисперсные намывные толщ наиболее эффективно разделение гидроотвала на отдельные участки — карты посредством намыва плавающих дренажных призм, линз и подушек, имеющих гидравлическую связь с дренажными сооружениями. Плавающие призмы, являясь основными связующими элементами дренажной системы, предназначаются для размещения

на них оборудования и трубопроводов, необходимых для перекрытия фильтрующими подушками карт, ограниченных призмами. Кроме того, дренажные призмы могут служить основанием разделительных дамб, обеспечивающих поочередное формирование и поэтапную подготовку к рекультивации отдельных карт.

Дренажная система может создаваться с использованием основного технологического оборудования, что определяет высокую экономическую эффективность работ по подготовке территорий гидроотвалов к последующему использованию.

На основании результатов опытно-промышленных исследований определяются конструктивные и технологические параметры подготовки гидроотвалов к рекультивации и устанавливаются зависимости между основными технологическими параметрами подготовительных работ.

Геомеханическое обоснование новой технологии формирования гидроотвалов должно предусматривать оценку несущей способности тонкодисперсных грунтов, определение пространственного положения, допустимых темпов возведения и высоты разделительных и отсечных дренажных призм, уточнение порядка рекультивации с учетом определенных для различных моментов времени осадок сформировавшихся намывных массивов.

Создание в ядерных зонах намывных сооружений системы разделительных и отсечных призм позволяет осуществлять поэтапную подготовку этих зон к рекультивации. Для оптимизации рекультивационных работ целесообразно использовать экономико-математическую модель возвращения намывных территорий в сферу сельскохозяйственного производства, в соответствии с которой рассматривается условие минимизации приведенных во времени народнохозяйственных затрат как суммы затрат горного предприятия и не полученного сельским хозяйством дохода за период восстановления нарушенной площади. Специальная технология возведения намывных сооружений овражно-балочного типа обеспечивает предупреждение эрозионных процессов и ускоренное восстановление занятых этими сооружениями площадей.

При этом в сферу сельскохозяйственного использования вовлекаются дополнительные по отношению к первоначально изъятым площади за счет создания территорий горизонтальной планировки на месте малоприспособленных овражно-балочных участков.

Защита подземных вод от химического загрязнения проводится на гидроотвалах путем экранирования их ложа слоями водоупорных грунтов, а также перехватом загрязненных вод с помощью специальных водозаборов. Защита поверхностных водоемов от попадания в них недостаточно очищенных вод осуществляется организацией замкнутой системы оборотного водоснабжения гидровскрышных и гидротранспортных комплексов с использованием при этом дренажных вод карьеров. Водоборот значительно ускоряется при создании системы дренажных элементов в ядерных зонах гидроотвалов. По дренажным элементам отжимаемая из тонкодисперсных грунтов вода поступает в упорные призмы и затем в приемы-аккумуляторы.

Реализация этих мероприятий наиболее успешно осуществляется при совместном складировании тонкодисперсных и раздельнозернистых материалов.

Проблема создания научных основ, разработки и внедрения технологии формирования гидроотвалов, обеспечивающей безопасность работ, повышение плотности гидравлической усадки вскрышных пород и отходов обогащения полезных ископаемых, предупреждение загрязнения атмосферы, подземных и поверхностных вод, ускоренную горнотехническую рекультивацию намывных территорий, имеет исключительно важное значение с позиций повышения экономической эффективности работы горнодобывающих предприятий и охраны окружающей среды.

**ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
НАМЫВНЫХ МАССИВОВ****1. 1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ
НАМЫВНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

В горнотехнической практике намывные массивы формируются преимущественно при складировании разрабатываемых гидравлическим способом вскрышных пород (гидроотвалы) или при гидравлической укладке отходов обогащения твердых полезных ископаемых (хвостохранилища). В горнопромышленных районах также сооружаются золоотвалы для гидравлической укладки золошлаков теплоэлектростанций, работающих на твердом топливе, и шлакоаккумуляторы специальных типов для длительного хранения различных отходов производства.

Технология формирования перечисленных сооружений имеет некоторые отличительные особенности, обусловленные их целевым назначением. Так, при создании хвостохранилища возрастают требования к защите окружающей среды в связи с интенсивным пылением пляжей и наличием сильноминерализованных вод, концентрация вредных компонентов в которых может превышать предельно допустимую.

Особо токсичны скапливающиеся в прудковых зонах хвостохранилищ воды, содержащие масла (жирные кислоты), соли цветных, тяжелых металлов, радиоактивные отходы и т. п. Осветлению сточных вод некоторых предприятий цветной металлургии препятствует использование в процессах обогащения жидкого стекла, наличие которого определяет образование устойчивых коллоидных систем и рыхлых осадков [1].

Современное состояние технологии возведения намывных сооружений освещено в работах [2, 3, 4, 5].

Гидроотвал представляет собой намывной массив, образующийся в результате подачи пульпы (гидросмеси) в заранее подготовленную емкость. В состав гидроотвала входят ограждающие дамбы (первичного и последующего обвалования), внутренние зоны, прудостойник, водозаборные и водосбросные устройства (канавы, колодцы, водоводы, ливнестоки), пульпопроводы.

Хвостохранилища — специальные сооружения, создаваемые для организованной гидравлической укладки отходов обогащения полезных ископаемых. Основные конструктивные элементы хвостохранилища такие же, как и у гидроотвалов. В связи с повышенной опасностью загрязнения окружающей среды при эксплуатации хвостохранилищ большое значение приобретает выполнение противофильтрационных мероприятий. Класс капитальности хвостохранилищ выбирается с учетом выхода хвостов,

Таблица 1

Класс капитальности	Вместимость хвостохранилища, млн. м ³	Выход хвостов, тыс. т/сут	Высота ограждающей дамбы, м	Степень ответственности сооружений и последствия их разрушения
I	>100	>10	>50	Особо ответственные, авария которых сопряжена с катастрофическими последствиями для населенных пунктов и предприятий, а также отравлением, загрязнением водоемов и водотоков питьевого назначения.
II	>100	>10	>50	Особо ответственные, авария которых не сопряжена с катастрофическими последствиями для населенных пунктов и предприятий. Вызывает затопление сельскохозяйственных угодий, отравление и загрязнение водоемов и водотоков, имеющих народнохозяйственное значение.
III	100-10	10-5	50-20	Малоответственные, авария которых не может вызвать серьезных последствий для населенных пунктов и предприятий. Вызывает затопление местности, не имеющей народнохозяйственного значения.
IV	<10	5-1	<20	Хвостохранилища в незастроенных местностях, авария вызывает затопление земель и загрязнение водоемов и водотоков, непригодных к использованию в данное время.
V	<10	<1	<10	Временные сооружения, авария которых вызывает затопление земель и загрязнение водоемов, непригодных к использованию в данное время.

степени ответственности сооружений, высоты ограждающей дамбы, условий эксплуатации (табл. 1) [5].

В основу разделения гидроотвалов на классы ответственности также положены признаки устойчивости дамб и безаварийности работы. Г. А. Нурок [2] разделяет гидроотвалы на три класса ответственности (табл. 2) с учетом рельефа местности; инженерно-геологических характеристик складываемых материалов и грунтов основания; наличия водохранилища при гидроотвале; положения гидроотвала относительно других промышленных и гражданских объектов; способа намыва, темпов намывных работ, конечной высоты гидроотвала; материала и способа возведения дамб обвалования.

По высоте гидроотвалы разделяются на низкие (до 10 м), средние (10-30 м) и высокие (более 30 м). В зависимости от годовой приемной способности (млн. м³) выделяют четыре категории гидроотвалов: I — более 5; II — 2-5; III — 1-2; IV — до 1. Класс капитальности постоянных

Таблица 2

Характерный признак гидроотвала	Классы ответственности гидроотвала для групп А и Б					
	I — особо ответственные		II — ответственные		Сооружения III класса ответственности	
	А	Б	А	Б	А	Б
Расположение по отношению к населенным пунктам и промышленным объектам	Вблизи населенных пунктов и промышленных объектов		При прорыве дамб возможно частичное повреждение промышленных объектов		Вдали от населенных пунктов и промышленных объектов	
Рельеф местности	На косогоре	На равнинной местности	На косогоре	На равнинной местности	На косогоре	На равнинной местности
Наличие водохранилища	Имеется	Отсутствует	Имеется	Отсутствует	Имеется	Отсутствует
Надежность пород основания	Недостаточно надежные	Надежные	Недостаточно надежные	Надежные	Недостаточно надежные	Надежные

и временных сооружений гидроотвалов принимается в зависимости от их категории [2].

Состояние намывных массивов как техногенных образований определяется физико-географическими, инженерно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими факторами.

К физико-географическим факторам относятся рельеф территории и климатические условия (количество и характер осадков, температурный и ветровой режимы), а также гидрографическая и гидрогеологическая характеристика сети водотоков и водоемов бассейна намывного сооружения. С геоморфологических позиций выделяют следующие типы гидроотвалов и хвостохранилищ: овражно-балочный (с односторонним обвалованием); равнинный (со всесторонним обвалованием); косогорный (с трехсторонним обвалованием); котлованный (намывной массив формируется в выработанном пространстве карьеров или в естественных впадинах). Геоморфологическим типом гидроотвалов определяются затраты на его строительство, мощность намывной толщи и относительные размеры ее зон. Рельеф местности влияет на условия устойчивости откосных сооружений (наклон основания и характер поверхностного стока). Формирование намывных сооружений в естественных понижениях рельефа открывает возможности предотвращения эрозионных процессов и обеспечивает создание территорий горизонтальной планировки на месте малопригодных участков.

Влияние климатических факторов проявляется в эрозионных процессах на откосах отвалов, соотношении между стоком и испарением, продол-

жительности сезона намыва, интенсивности дефляционных процессов. Промерзание откосов дамб вызывает изменение положения депрессионной поверхности и, следовательно, коэффициента запаса устойчивости.

Влияние жаркого климата на состояние намывных массивов хвостохранилищ золоторудной промышленности в ЮАР описано в работе [49]. Намыв хвостохранилищ ведется тонкими слоями в направлении от дамбы к прудку. Карты намыва ограждаются дамбами обвалования, создаваемыми из отходов обогащения, средние значения физико-механических характеристик которых составляют: плотность — $1,925 \text{ г/см}^3$, сцепление $C = 0$ и угол внутреннего трения — 35° . Генеральные углы откосов дамб высотой до 60 м варьируют в весьма значительных пределах: заложение откосов составляет от 1:2 до 1:4 (угол откоса $26,5\text{--}14^\circ$). Хвосты состоят в основном из кварца и иногда содержат небольшое количество пирита (до 0,7 %), при окислении которого образуется пленка, предотвращающая эрозию откосов. Возможность интенсивной подсушки хвостов приоткосной зоны в сочетании с эффективной работой дренажных устройств обеспечивает, как правило, надежную эксплуатацию хвостохранилищ. Препятствия движению гидросмеси по пляжу намыва создаются в результате деятельности дождевых потоков и ветрового воздействия, приводящих к образованию промоин и валов. При этом нарушаются условия раскладки частиц, и в пляжной зоне формируются линзы с низкой водопроницаемостью.

Инженерно-геологические факторы включают в себя геологическое строение основания и тела сооружения, вещественный состав, водно-физические, деформационные и прочностные характеристики грунтов. Наличие ослабленных (наклонных или горизонтальных) контактов в основании намывных массивов определяет зависимость устойчивости дамб от характеристик сопротивления сдвигу по контактам слоев и угла наклона основания. При изучении намывных толщ с целью их последующей инженерно-геологической схематизации выделяют гидроотвалы и хвостохранилища, внутренние зоны которых сложены раздельнообломочным, тонкодисперсным или смешанным материалом. В зависимости от состава намывных грунтов изменяются скорость водооборота, уплотняемость и несущая способность внутренних зон сооружений.

Существенное влияние на устойчивость дамб оказывает наличие в их основании сильносжимаемых грунтов. Прочность тонкодисперсных грунтов тела и оснований сооружений определяется степенью их уплотнения. В качестве индикатора напряженно-деформированного состояния глинистых водонасыщенных грунтов может рассматриваться избыточное поровое давление, т. е. часть нагрузки от собственной массы намывных грунтов или внешней нагрузки, воспринимаемая поровой водой. Уплотнение и упрочнение грунтов могут происходить лишь при условии оттока поровой воды и рассеивания избыточного порового давления. Возникновение избыточного порового давления приводит к уменьшению воспринимаемых минеральным скелетом напряжений (эффективных) и соответственно снижению сопротивления грунта сдвигу. В период формирования намыв-

ных сооружений устойчивость дамб на слабых основаниях и уплотняемость техногенных толщ водонасыщенных тонкодисперсных грунтов будут определяться темпами роста нагрузки и условиями дренирования (длиной пути фильтрации).

Влияние гидрогеологических факторов рассматривается путем оценки обводненности основания (наличия водоносных горизонтов, условий их питания и разгрузки); действия сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления при движении фильтрационного потока в теле дамбы; потерь на фильтрацию в ложе и на испарение; эффективности дренажных устройств.

Движение воды из прудка-отстойника в сторону откосных сооружений, сложенных фильтрующим материалом, вызывает уменьшение нормальной составляющей веса блоков в пределах вероятной поверхности скольжения и соответственно удерживающих сил (напряжений). При этом происходит оплывание откосов за счет суффозионного выноса мелких частиц, а при отсутствии мер по предотвращению фильтрационных деформаций — оползание и разрушение дамбы с прорывом складированных грунтовых масс. В случаях, когда кривая скольжения (оползания) захватывает сложенную тонкодисперсным материалом внутреннюю приоткосную (пляжную) зону гидроотвалов, уменьшение удерживающих сил (сопротивления сдвигу) происходит также за счет возникновения избыточного (сверхгидростатического) порового давления в намывных грунтах. Размещение ограждающих дамб на обводненных основаниях, сложенных сильносжимаемыми грунтами, вызывает опасность возникновения оползней выдавливания. Наличие в основании дамбы напорного водоносного горизонта приводит к уменьшению эффективных напряжений в водонепроницаемом слое, отделяющем намывные массы от напорного пласта. При этом возможно возникновение оползней выдавливания или контактных.

Гидростатическое взвешивание тонкодисперсных минеральных частиц во внутренних зонах сооружений обуславливает текучее состояние верхней части намывного массива и большую продолжительность преобразования находящейся в состоянии суспензии пульпы (гидросмеси) в осадок. Наличие во внутренних зонах грунтов текучей и текучепластичной консистенции влечет за собой исключение на длительные сроки значительной части (до 50–80 %) территорий заполненных гидроотвалов и хвостохранилищ из сферы дальнейшего народнохозяйственного использования.

Технологические факторы, определяющие состояние намывных массивов:

способы гидровскрышных работ или переработки минерального сырья на обогатительных фабриках; способы возведения дамб и намыва (выпуска) пульпы во внутренние зоны сооружений; интенсивность намыва; динамические и статические нагрузки.

При наличии во вскрышной толще нескольких литологических разностей, разрабатываемых с применением средств гидромеханизации, формируется намывной массив, в котором чередуются слои, отличающиеся по вещественному составу, водно-физическим и механическим свойствам.

Таблица 3

Хвосты	Схема выщелачивания	Время осаждения, ч	Плотность скелета, г/см ³	Набухание, доли ед.	Угол внутреннего трения φ	Сцепление C , МПа
Глинистые	Кислотная Содовая	41	1,37	0,05	11° 30'	0,05
		177	1,11	0,21	4° 15'	0,012
Суглинистые	Кислотная Содовая	9	1,50	0	26° 36'	0,025
		81	1,47	0,05	14° 06'	0,032

вам. Строение намывного массива зависит от применяемого способа разработки (гидромониторно-землесосными установками или плавучими земснарядами) и порядка выемки различных пород (валовая или селективная выемка).

Гранулометрический состав намываемого материала и темпы образования осадка из пульпы хвостов рудообогатительных фабрик зависят от применяемых технологических схем переработки руд. Так, например, после кислотного выщелачивания алюмосиликатных руд хвосты нейтрализуются известью (загипсовываются), и в прудке-отстойнике происходит быстрое осаждение взвесей и осветление воды. При прорыве упорной призмы хвостохранилища был вынесен слагавший ее песок, а тонкодисперсный загипсованный материал прудковой зоны остался и образовал уступы до 10 м высотой. Влияние технологических схем переработки алюмосиликатных руд на свойства хвостов может быть проиллюстрировано данными табл. 3. К суглинкам отнесена отсеянная фракция ($< 0,1$ мм) алюмосиликатной руды.

Состояние намывного массива зависит от способов формирования ограждающих дамб, предусматривающих возведение их на полную высоту и заблаговременное создание емкости для размещения гидросмеси; поэтапное наращивание из насыпных или намывных материалов. При первом способе возведения дамб производится сосредоточенный сброс гидросмеси из торца пульповода в предварительно созданную емкость (подводный намыв), а фракционирование (дифференциация частиц по крупности) затруднительно. Использование второго способа обеспечивает лучшие экономические показатели гидравлического складирования за счет сокращения затрат на возведение дамб и исключения суффозии откосов благодаря тому, что намывная упорная призма является обратным фильтром, а также сравнительно быстрой водоотдачи и уплотнения материала в пляжной зоне.

Способы намыва, т. е. избирательного прекращения движения минеральных частиц при перемещении пульпы по пляжу, приведены в табл. 4.

При гидравлическом складировании характер отложения материала зависит от изменяющихся в процессе разработки вскрыши условий залегания пород в массиве или от исходного состава хвостов, перемещения фронта намыва, расхода пульпы и консистенции гидросмеси (Т:Ж). При

Таблица 4

Способ укладки грунтов	Размещение намывного пульповода	Способ выпуска пульпы из пульповода	Намыв, перемещение фронта работ
Низкоопорный	На опорах высотой 1,5 м	Рассредоточенный одновременно из многих выпусков, отходящих от намывного пульповода	Односторонний параллельное веерное смешанное Двусторонний параллельное веерное смешанное
Эстакадный	На эстакадах высотой свыше 1,5—2 м	Сосредоточенный — из торца пульповода	Кольцевой (производится больше чем по двум сторонам или по всему периметру гидроотвала) параллельное
Безэстакадный	На гидроотвале при непрерывной крановой переукладке намывного пульповода На дамбах без переукладки пульповодов, располагаемых в пределах яруса намыва		

подаче пульпы в накопительную емкость происходит дифференциация намывных масс на фракции в плане. При удельном расходе свыше 1 л/(с·м) и плотности пульпы более 1,1 г/см³ грубые частицы концентрируются около выпуска пульпы, где формируется приоткосная (пляжная) зона, преимущественно тонкопесчаные и пылеватые частицы слагают промежуточную зону и самые тонкие (глинистые и пылеватые) частицы откладываются в прудковой зоне гидроотвалов и хвостохранилищ (для хвостохранилищ выделение пылеватых и глинистых частиц производится условно без учета минерального состава). При малых удельном расходе и плотности пульпы иногда наблюдается явление обратного фракционирования. С ростом содержания глинистой фракции по направлению к пруду-отстойнику снижаются сдвиговые и фильтрационные характеристики намытого материала.

Влияние дифференциации частиц при намыве на устойчивость откосных сооружений возрастает с увеличением высоты гидроотвалов и хвостохранилищ. При высоте дамб свыше 30 м и углах их откоса до 12—14° наиболее опасная поверхность скольжения захватывает намывной массив и устойчивость гидроотвалов в существенной степени определяется прочностными характеристиками намытого материала. Уменьшение размера частиц с удалением от фронта намыва соответственно приводит к снижению несущей способности внутренних зон, большая часть которых является недоступной даже для оборудования в болотоходном исполнении.

Устойчивость откосных сооружений, несущая способность внутренних

зон, а также объем укладываемых в них материалов зависят также от темпов намыва, изменяющихся от 1 до 10 м/год. Скорость роста намывного массива обычно достигает максимальных значений в начальный период формирования гидроотвалов и хвостохранилищ овражно-балочного типа и по мере увеличения их площади снижается. При отсутствии специальных мероприятий, направленных на форсирование консолидации толщ тонкодисперсных намывных материалов, высокими темпами наращивания гидроотвалов определяются низкие значения начальной степени уплотнения, сопротивления сдвигу и несущей способности техногенных массивов и сложенных сильносжимаемыми грунтами оснований.

Нарушения устойчивости откосов дамб гидроотвалов и хвостохранилищ в ряде случаев могут обуславливаться динамическими нагрузками, возникающими при землетрясениях или связанными с ведением взрывных работ в непосредственной близости от намывных сооружений. Эти нагрузки вызывают гиксотропное разжижение техногенных грунтов при изменении соотношения сдвигающих и удерживающих сил в пределах призмы возможного оползня.

Влияние перечисленных факторов может быть проиллюстрировано некоторыми примерами аварий намывных сооружений. Оползневые деформации гидроотвалов обычно связаны с технологией их формирования.

Наиболее значительным (по объему сместившихся грунтов) является оползень северного откоса гидроотвала № 1 Лебединского карьера (КМА). В гидроотвал за 7 лет уложено 40 млн. м³ четвертичных суглинков и сеноман-альбских песков, причем суглинки (слой мощностью 4—6 м) намывты в нижней части гидроотвала. Основание отвала сложено торфом и аллювиальными суглинками. Геометрические параметры откоса гидроотвала до оползня следующие: средний угол наклона 12°; общая высота 36 м; высота и угол наклона нижнего и верхнего ярусов соответственно составляли 16 м и 17°, 20 м и 19°; ширина бермы 16 м. Прудок-отстойник в районе оползня находился на расстоянии 200 м от бровки обвалования. В результате оползания откоса гидроотвала кран, работавший на намыве, сполз вниз на 24 м и в сторону выноса на 120 м. Оползание основной массы грунтов происходило в течение 30—40 мин; после этого наблюдались незначительные смещения пород, закончившиеся через 4—5 ч. Эти смещения сопровождалось глухими подземными ударами и шумом. Оползень в плане имеет почти изометричную, циркуобразую форму. Ширина его по хорде, стягивающей концы дугообразного главного уступа, равна 420 м, длина по оси оползня составляет 430 м, площадь оползня — 15 га, объем оползневых масс — 1,8 млн. м³ (рис. 1) [6].

Оползнем были нарушены высоковольтные электролинии и пульповоды гидромеханизации, а также было перекрыто русло р. Осколец. Нарушение равновесия значительного объема грунтов является результатом совокупного влияния следующих неблагоприятных условий и факторов: наличие слабых пород в основании откоса и нижней намывной части гидроотвала; несоответствие темпа наращивания гидроотвала скорости консолидации (уплотнения) намывных суглинков и коренных торфяно-илистых пород; возрастание гидродинамических сил по мере увеличения высоты гидроотвала

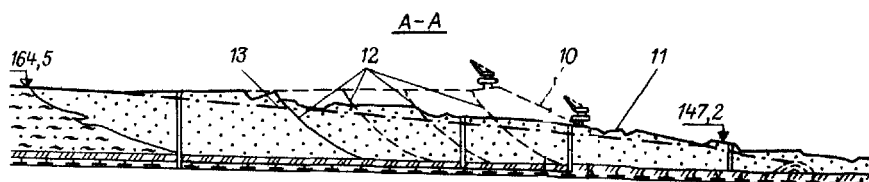
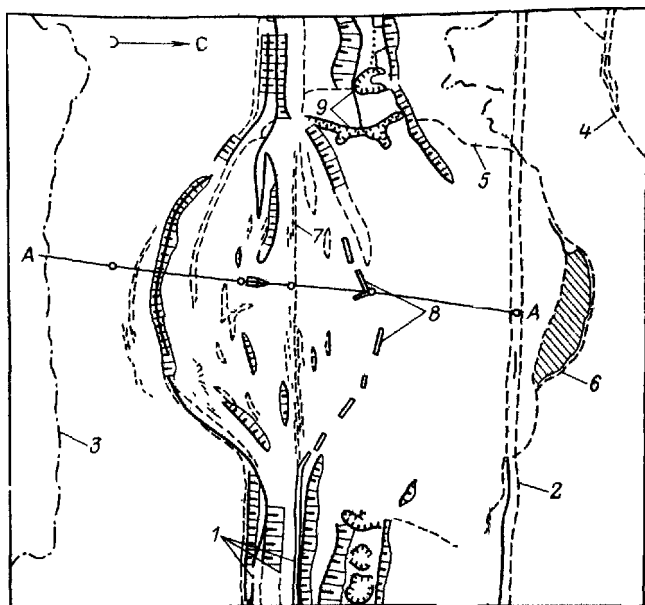


Рис. 1. Схема оползня гидроотвала № 1 Лебединского карьера (КМА):

1 — откосы; 2 — спрямленное русло р. Осколец; 3 — контур прудковой зоны; 4 — граница зоны подтопления; 5 — контур оползня; 6 — валы выпирания; 7 — положение пульповода до оползня; 8 — положение пульповода после оползня; 9 — контуры промоин, образовавшихся вследствие сосредоточенной фильтрации; 10 — профиль откоса до оползня; 11 — профиль откоса после оползня; 12 — кривая скольжения; 13 — депрессионная кривая

Весьма показательным является оползень дамбы гидроотвала № 4 Кедровского разреза ПО "Кемеровоуголь". Здесь с применением средств гидромеханизации разрабатывались лессовидные суглинки. К моменту возникновения оползня высота гидроотвала достигала 30 м. Угол откоса ограждающей дамбы составлял $23-25^\circ$. Ограждающая дамба длиной около 300 м отсыпалась из привозных пород. Намыв производился как со стороны обвалования, так и со склонов погоя, в котором располагался гидроотвал, из торцов пульповодов. Интенсивность намыва составляла около 6 м/год. За год в гидроотвал укладывалось около 2 млн. м³.

При нарастании обвалования в зимний период с отступлением на 20 м в сторону пляжа намыва шириной 20 м при мощности отсыпаемого

слоя 4 м скорость отсыпки составляла 300 м/мес (по длине дамбы). После того как было отсыпано 250 м обвалования, возник оползень шириной около 200 м; поверхность отрыва проходила по границе обвалования и пляжа намыва. Оползшая масса сместилась за сутки на 300 м и расположилась под углом 5–10°, после чего подвигание ее прекратилось. Существенную роль сыграла большая интенсивность нагружения, так как при отсыпке обвалования возросло поровое давление в намывных сутлинках, что привело к уменьшению их сопротивления сдвигу и оползю.

Влияние гидрогеологических факторов на устойчивость ограждающих дамб гидроотвалов и хвостохранилищ в наибольшей степени сказывается при напоре осветленной воды на обвалование, переливе воды и пульпы и последующем прорыве дамб. Следует отметить, что эти аварийные ситуации создаются прежде всего в результате нарушения технологии намыва. Прорывы дамб происходили на гидроотвалах Назаровского угольного разреза, Семилукского огнеупорного завода, комбината "КМАруда", Лебединского ГОКа, хвостохранилищах горно-обогатительных предприятий цветной и черной металлургии [3, 6, 7, 8, 9].

В качестве основных причин аварийных ситуаций отмечаются формирование обвалования из мерзлого грунта, несоблюдение безопасных размеров пляжа и положения границы прудка-отстойника, минимальное превышение гребня дамбы над горизонтом воды, недостаточная эффективность водосбросных сооружений. При наличии значительных объемов воды (до 10 млн. м³) в прудковых зонах управление состоянием намывного массива производится за счет увеличения потребления оборотной воды на производственные цели или сброса части водных запасов в резервную емкость.

На гидроотвалах Семилукской группы карьеров огнеупорных глин прорывы сложенных насыпным глинистым материалом дамб происходили в результате интенсивного размыва обвалования потоком пульпы, сбрасываемой из торца пульповода. На этих гидроотвалах был внедрен комплекс мероприятий, предусматривающих: применение рассредоточенного намыва сутлинков и глин слоями мощностью до 0,3–0,4 м; сохранение постоянной площади прудка-отстойника; проведение систематического контроля состояния дамб и намывных масс пляжной зоны; откачку осветленной воды из отстойников по окончании каждого сезона намыва. Осуществление перечисленных и ряда других мероприятий обеспечивает создание широкого пляжа и отстойника, прижатого к естественному склону или расположенного в центре гидроотвала [8].

Следствием влияния климатических и технологических факторов может служить авария хвостохранилища, состоящего из секций № 1 и 2, платинового рудника "Бэфокинг" (ЮАР). Здесь отходы обогащения складировались в двух секциях общей длиной 2 км и шириной 1 км, созданных в речной долине (рис. 2). Намыв осуществлялся из торцов пульповодов, расположенных с трех сторон секции № 1. Высота дамб составляла около 20 м. Прорыв дамбы секции № 1 произошел после сильного дождя (выпало 75 мм осадков за 2 ч). Предпринятая на следующий день попытка от-

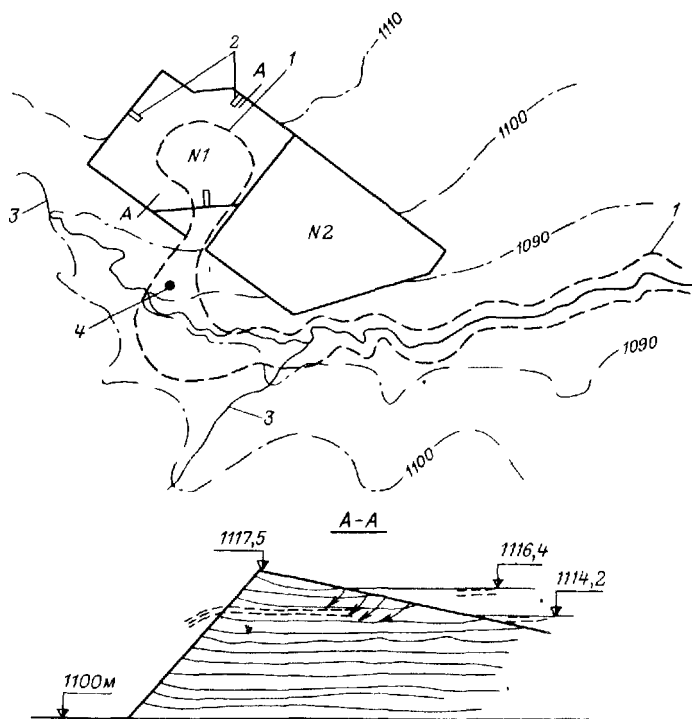


Рис. 2. Схема деформации хвостохранилища рудника "Бэфокинг" (ЮАР):

1 – контур прорыва пульпы; 2 – трубопроводы выпусков пульпы; 3 – река и ее приток; 4 – ствол шахты (стрелками показано направление прорыва пульпы)

вестиводу из первой секции оказалась неудачной, началось высачивание на внешнем откосе (см. рис. 2) и затем произошел прорыв около 3 млн. м³ хвостов на участке дамбы шириной 130 м (на профиле дамбы показаны намывные слои). Дамба была разрушена на 2/3 высоты, хвосты затопили ствол шахты. Около 2 млн. м³ хвостов достигли водохранилища ниже по течению реки на 45 км [49].

В результате нарушения технологии возведения из глинистых грунтов ограждающей дамбы хвостохранилища горно-химического предприятия в теле дамбы образовались ослабленные зоны. Подпор на дамбу высотой до 22 м хранимого рассола при отсутствии пляжа привел к прорыву жидкой фазы хвостов, в результате был нанесен значительный ущерб водному, рыбному и сельскому хозяйству обширного района. Выход из строя секции хвостохранилища вызвал также существенное снижение производственной мощности предприятия. При возведении дамбы в несколько очередей инженерно-геологические исследования ее состояния не проводились.

Разрушения хвостохранилищ при землетрясениях происходили в Чили, где они имели катастрофические последствия - гибель людей и уничтожение населенных пунктов. В качестве основных причин разрушения хвостохранилищ рассматриваются разжижение слабоуплотненного материала прудковой (ядерной) зоны под действием сейсмических толчков и недостаточная динамическая устойчивость упорной призмы. Дамбы большинства хвостохранилищ имели крутые уклоны внешних откосов: 1:2 — 1:1. Законсервированные обезвоженные хвостохранилища в результате землетрясения не разрушались, хотя в их бортах зафиксированы трещины. Наименьшие разрушения получили хвостохранилища, контуры которых имели в плане криволинейное очертание. Проведенный анализ аварий хвостохранилищ в Чили показал, что при разрушении упорных призм происходило вытекание верхнего слоя состоящей из отложений ядерной зоны мощностью около 10 м, находящихся в текучем состоянии. Залегающие ниже отложения пылевато-глинистого состава находятся в пластичном состоянии и, возможно, не разжижаются. Поэтому ускорение процессов формирования пластичных отложений ядерной зоны позволило бы сократить объемы материала, опасного с позиций возникновения селевых потоков при сейсмическом воздействии.

1.2. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ И СОСТОЯНИЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

В различных отраслях горной промышленности ежегодно укладываются в гидроотвалы и хвостохранилища значительные объемы вскрышных пород и отходов обогащения полезных ископаемых.

Приведем примерные объемы (млн. м³) вскрыши, уложенной за период до 1986 г. в гидроотвалы, для основных горнопромышленных районов, где на карьерах применяют средства гидромеханизации: в бассейне КМА (комбинаты "КМАруда" и Лебединский, Стойленский, Михайловский ГОКи) — 330; в Кузбассе (разрезы ПО "Кемеровоуголь") — 675; в Канско-Ачинском угольном бассейне (разрез "Назаровский") — 63; в Предкарпатском сероносном бассейне (Роздольский и Яворовский горно-химические комбинаты) — свыше 90; на Семилукских карьерах огнеупорных глин — 80.

В СССР на горно-обогатительных предприятиях черной и цветной металлургии, горно-химического сырья и промышленности стройматериалов ежегодно складываются гидравлическим способом сотни миллионов кубометров отходов (хвостов) обогащения. Мировой объем укладки хвостов обогащения предприятиями цветной металлургии за 1982 г. оценивается в $5 \cdot 10^9$ т [49]. Число складированных хвостов в США за последние 40 лет составляет около 30 млрд. т, а занятая ими площадь — свыше 100 тыс. га [9].

На горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) Министерства черной металлургии СССР к настоящему времени уложено около 4 млрд. м³ хвостов и аккумуляровано более 1 млрд. м³ воды и шламов текучей

Таблица 5

Бассейн, карьер, разрез	Стоимость отвальных работ при различных способах отвалообразования, коп/м ³			
	Экскаватор- ный с ис- пользовани- ем железно- дорожного транспорта	Бульдозерный с использо- ванием авто- транспорта	Конвейер- ный	Гидравли- ческий
КМА				
Лебединский	6,8–6,4	3,4–4,8	9,9–12,0	2,7–3,0
Михайловский	6,3–11,6	7,8–5,5	5,5–6,0	3,5–4,0
Кузнецкий обобщенные данные по всем разрезам	10,0–14,5	7,8–12,3	нет	5,2–6,9

консистенции [10]. В двух крупнейших железорудных бассейнах — КМА и Криворожском — ежегодно складывается свыше 100 млн. м³ отходов обогащения.

Применение гидравлического способа разработки рыхлых вскрышных пород характеризуется высокими технико-экономическими показателями: себестоимость производства вскрышных работ способом гидромеханизации в 2–2,5 раза ниже (табл. 5), а производительность труда в 2 раза выше, чем при производстве вскрышных работ экскаваторным способом в сочетании с колесными видами транспорта. Внедрение средств гидромеханизации обеспечивает также сокращение срока ввода оборудования в действие в 1,5–2 раза, низкие капитальные затраты и резкое (в 2–3 раза) снижение затрат на дренирование карьерного поля в период строительства.

Состояние гидроотвалообразования целесообразно подробно рассмотреть на примере двух важнейших горнопромышленных районов — КМА и Кузбасса, где осуществляется внедрение новой технологии формирования гидроотвалов. Характеристики гидроотвалов карьеров Предкарпатского сероносного бассейна, Семилукского огнеупорного и Белгородского цементного заводов, Назаровского разреза с достаточной полнотой даны в работах [2, 3, 7, 8].

Вскрышные породы карьеров КМА размещаются в восьми гидроотвалах, из которых эксплуатируются в настоящее время гидроотвал Лебединского ГОКа в балке Чуфичева и гидроотвал Михайловского ГОКа в логе Шамаровский, используемом также для складирования хвостов обогащения. На гидроотвале Лебединского ГОКа в балке Березовый Лог завершаются рекультивационные работы. Основные параметры гидроотвалов карьеров КМА характеризуются данными табл. 6. Наиболее крупные гидроотвалы карьеров КМА — овражно-балочного типа. К равнинному типу относятся законсервированные гидроотвалы № 1, 2, 3 Лебединского карьера и гидроотвал "Михайловский".

Таблица 6

Карьер, гидроотвал	Параметры гидроотвала			Укладываемый годовой объем, млн. м ³
	Площадь, га	Максималь- ная высо- та, м	Уложено грунтов, млн. м ³	
Лебединский				
№ 1	116	36	30,5	1-6
№ 2	40	9,1	37	1-5
№ 3	25	3	0,5	0,5
"Березовый Лог"	1128	75	250	2-22
"Балка Чуфичева"	207	45	31	1-6,5
Михайловский	90	3,1	1,8	0,8-1
"Шамаровский Лог"	218	24	18	1-2,5
Стойленский				
"Симонова пасека"	30	20	3	1-2

При заполнении гидроотвалов преимущественно использовался сосредоточенный способ выпуска пульпы. Рассредоточенный намыв применялся на гидроотвалах Михайловского карьера. Формирование песчаных ограждающих дамб осуществлялось путем безэстакадного одностороннего или двухстороннего намыва. На действующем гидроотвале Михайловского карьера дамба до высоты 7 м намывалась из отходов обогащения пионерно-торцевым способом, а затем наращивалась из насыпного суглинка на 3-4 м в год.

Различие в интенсивности ведения вскрышных работ, литологическом составе вскрышной толщи и условиях размещения отвалов предопределило различия в их общей компоновке, основных параметрах (см. табл. 6), способах формирования, а также в строении отвальных массивов (рис. 3).

Гидроотвалы № 1 и 2 Лебединского карьера предназначались в основном для складирования объемов горнокапитальной вскрыши в строительный период: в гидроотвале № 1 предполагалось укладывать четвертичные и палеогеновые суглинки, разрабатываемые гидроустановками, а в гидроотвале № 2 — сеноман-альбские пески, извлекаемые земснарядами.

Оба гидроотвала располагались в заболоченной пойме р. Осколец и были образованы путем устройства первичного обвалования из местных грунтов, в основном торфов, экскаваторами-драглайнами с разравниванием и уплотнением насыпей бульдозерами. Мероприятия по подготовке оснований гидроотвалов не проводились.

Формирование гидроотвала № 2 с применением хорошо освоенной к тому времени технологии двухстороннего безэстакадного намыва песчаных пород технических затруднений не представляло.

В период эксплуатации этого гидроотвала произошел прорыв дамбы обвалования северного откоса в результате перелива пульпы с выносом в течение 15-20 мин через образовавшуюся промоину воды и разжижен-

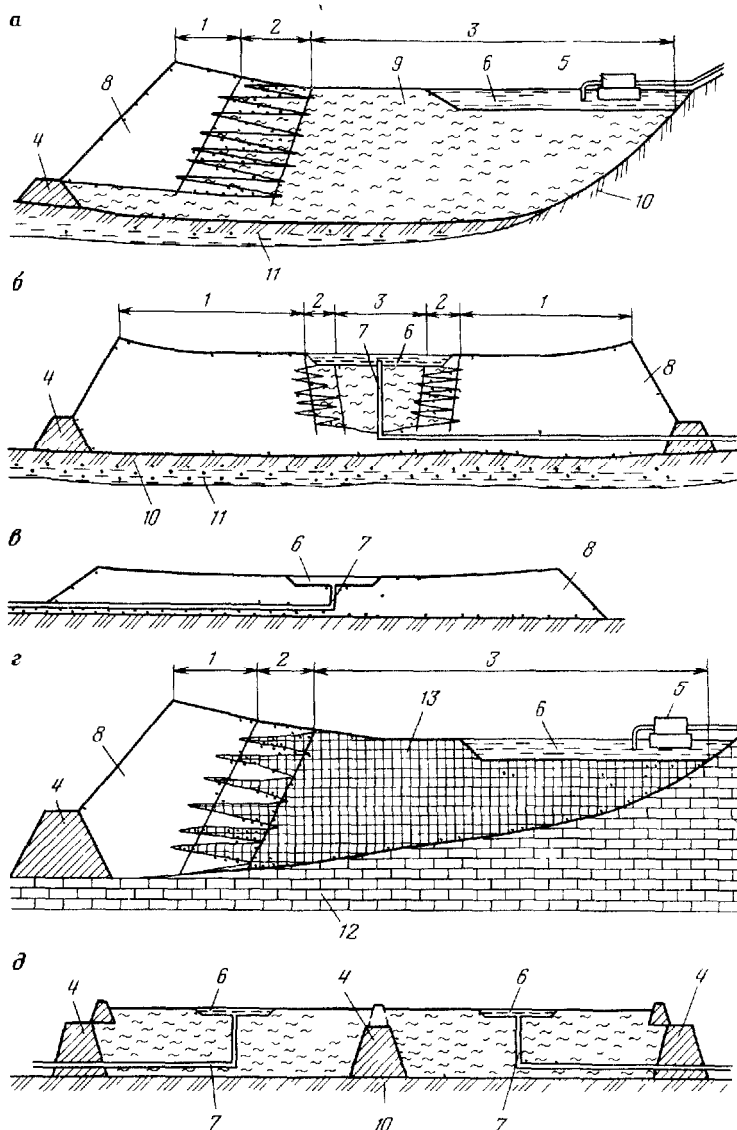


Рис. 3. Схемы строения намывных массивов заполненных гидроотвалов карьеров КМА (по Ю.Н. Дзячкову): Лебединского (а б в – соответственно № 1, 2, 3); Стойленского (г – “Симонова пасека”); Михайловского (д).

1 – упорная призма, 2 – промежуточная зона, 3 – центральная (ядерная) зона, 4 – дамба первичного обвалования, 5 – насосная станция, 6 – пруд-отстойник, 7 – водосборный колодец, 8 – намывный песок, 9 – суглинок намывный, 10 – гумусированный суглинок, 11 – суглинисто-супесчаные грунты основания, 12 – мел коренной, 13 – меловая паста

ных грунтовых масс ядра в объеме около 300 тыс. м³. Причиной аварии послужило игнорирование обслуживающим персоналом элементарных правил технологии безэстакадного намыва, а также отсутствие на гидроотвале геотехнического контроля.

Более сложным было формирование гидроотвала № 1, предназначенного для складирования суглинистых и меловых грунтов.

По расчетам авторов проекта, намыв по всему периметру гидроотвала четвертичных суглинков, содержащих до 60 % песчаных частиц, благодаря фракционированию при намыве должен был обеспечить формирование преимущественно из песчаных фракций упорных призм, обладающих достаточной устойчивостью и несущей способностью.

Укладку суглинков в первый год заполнения гидроотвала намечалось вести эстакадным способом с применением инвентарных козелковых опор и поворотных лотков. Для устройства обвалования из намывного грунта предполагалось использовать экскаваторы-драглайны.

В последующие годы наращивание гидроотвала предусматривалось с применением безэстакадного способа намыва. Заданный темп намыва (9,5 м за первый год заполнения) не соответствовал формирующимся при этом физико-механическим свойствам намывных грунтов. Из-за слабой водоотдачи намывной массив длительное время был практически недоступен для машин и механизмов. Укладка же вручную фанерных труб в качестве разводящих пульповодов оправдывала себя лишь как временная, вынужденная мера. Последующее наращивание гидроотвала № 1 осуществлялась безэстакадным намывом по его периметру песчаных грунтов, разрабатываемых земснарядами.

Эксплуатация гидроотвала № 1 была прекращена в связи с происшедшим здесь крупным (объемом около 1,8 млн. м³) оползнем, анализ причин которого приведен выше.

В связи с вынужденным прекращением намыва гидроотвала № 1 было выбрано новое место временного складирования вскрышных пород. Так, в пойме р. Осколец был образован гидроотвал № 3, который функционировал менее года и представлял собой песчаную подушку мощностью около 3 м, намывную на заболоченных пойменных отложениях.

Оценивая опыт гидроотвалообразования в период строительства Лебединского карьера, необходимо отметить необоснованность первоначальной проектной схемы намыва гидроотвала № 1 (крутой внешний откос — 1:3, недопустимо высокая скорость намыва суглинков — до 10 м/год, излишне оптимистичный прогноз фракционирования и консолидации суглинков и др.); отсутствие в проектах гидроотвала мероприятий по подготовке оснований, дренажу упорных призм, контролю за качеством намыва, низкий уровень технического надзора за производством работ и геотехнического контроля на гидроотвалах.

Однако, несмотря на эти недостатки, складирование 40 млн. м³ разнородных вскрышных пород в новых и сложных условиях было проведено, а приобретенный здесь опыт позволил в дальнейшем усовершенствовать технологию и организацию гидроотвальных работ.

Гидроотвал "Симонова пасека" Стойленского карьера располагался в одноименной балке, перегороженной насыпной пионерной дамбой из суглинков. Основание гидроотвала было сложено трещиноватыми, частично закарстованными меломергельными породами. Для уменьшения фильтрационных потерь наиболее проницаемый участок ложа гидроотвала был закранирован намывным способом. Для намыва противофильтрационного экрана использовался суглинок, слагающий один из склонов балки. Забой размывался гидромонитором, и пульпа по самотечным разводящим пульповодам подавалась к местам наибольшего водопоглощения. Это мероприятие позволило снизить фильтрационные потери в гидроотвале и организовать здесь оборотное водоснабжение.

В отличие от других гидроотвалов в балке Симонова пасека складировалось только два вида пород: сеноман-альбские пески и меломергельные породы. Гидросмесь, содержащая примерно в равных количествах песчаные и меломергельные породы, подавалась к пионерной дамбе, вдоль которой посредством одностороннего безэстакадного намыва формировалась песчаная упорная призма.

В гидроотвале Михайловского карьера с четырехсторонним первичным обвалованием из местных пойменных отложений предусматривалось складировать четвертичные суглинки путем намыва грунтов с подсушкой, сущность которого заключалась в поочередном кольцевом, рассредоточенном, эстакадном намыве суглинков на одну из двух карт. В это время слой грунта, намытый на вторую карту, подвергался обезвоживанию посредством комплексного воздействия естественных процессов: фильтрации, выветривания, испарения.

Затруднения при гидроотвалообразовании, вызванные медленной консолидацией намывных слоев, послужили причиной прекращения работы гидровскрышного комплекса на Михайловском карьере, несмотря на весьма высокую его производительность.

Естественной емкостью крупнейшего (проектный объем 220 млн. м³) гидроотвала ТПК КМА является долина необводненной балки Березовый Лог. Дно и склоны балки сложены четвертичными, преимущественно глинистыми отложениями, которые подстилаются толщей мела туронского яруса меловой системы. На отдельных участках территории балки мел выходит на поверхность. Четвертичные отложения и мел, как правило, перекрываются почвенно-растительным слоем мощностью от нескольких десятков сантиметров до 1,5–2 м, мощность макропористых лёссовидных суглинков изменяется от 0,7 до 8 м.

Перед намывом на площади основания первичной упорной призмы и основания низового прудка-отстойника почвенно-растительный слой был срезан бульдозером и уложен в первичные дамбы обвалования. Первичная упорная призма намывалась из среднезернистого песка. В дальнейшем схема наращивания упорной призмы была изменена — односторонний намыв заменен двусторонним, позволяющим возводить призму с опережением по высоте. В первые годы эксплуатации гидроотвала в северной его части производился поочередный намыв грунтов, резко отличающихся по физико-механическим свойствам (песчано-глинистые

отложения неокомского яруса, четвертичные суглинки, мел, сеноман-альбские пески). Разнородность намываемых грунтов, различная продолжительность намыва, изменение в широких пределах ширины пляжной зоны и местоположения выпуска пульпы в процессе намыва обусловили слоистое, неоднородное в плане и профиле строение гидроотвала. В теле и основании упорной призмы гидроотвала сформировались три прослойки-линзы, представленные глинисто-меловыми и суглинистыми пластами.

Максимальные годовые объемы (22 млн. м^3) гидровскрыши достигнуты на Лебединском карьере, где укладка разнородных грунтов осуществлялась в течение пятнадцати лет в одном гидроотвале "Березовый Лог".

Создание в ядерной зоне гидроотвала системы намывных дренажных элементов обеспечило форсирование консолидации тонкодисперсных глинисто-меловых грунтов и возможность выполнения горнотехнической рекультивации двух секций общей площадью 550 га . В третьей секции гидроотвала площадью около 200 га производили складирование отходов обогащения комбината "КМАруда" и затем выполняли работы по рекультивации. До формирования дренажных элементов доступными для рекультивационного оборудования были лишь упорная призма и частично пляжная зона общей площадью около 200 га .

Гидроотвал в балке Чуфичева используется для складирования меловых пород с годовыми объемами до 6 млн. м^3 . Упорная призма формируется из намывного песка, транспортируемого из Лебединского карьера.

В Кузбассе вскрышные работы с применением средств гидромеханизации производились на большинстве разрезов ПО "Кемеровоуголь". Наибольшие объемы гидровскрышных работ были достигнуты в период 1965—1976 гг., когда ежегодно разрабатывали гидромониторами и укладывали в гидроотвалы до 30 млн. м^3 (табл. 7).

Указанные в таблице гидроотвалы относятся к овражно-балочному типу. Исключение составляет гидроотвал равнинного типа "Южный" разреза "Колмогоровский".

Снижение объемов гидровскрышных работ в бассейне произошло из-за уменьшения числа разрезов, на которых применяют гидромеханизацию, и снижения объемов на действующих разрезах. Прекращены гидровскрышные работы на разрезах "Краснобродский", "Киселевский", им. Вахрушева, "Прокопьевский" и "Листвянский" в связи с отработкой наносов в пределах их технических границ. Вместе с тем объемы вскрышных пород, которые могут разрабатываться средствами гидромеханизации, оцениваются для Кузбасса в 3 млрд. м^3 , из которых около 1 млрд. м^3 могут быть отработаны с применением существующей технологии.

Для условий Кузбасса доказаны возможность и техническая целесообразность использования гидротранспорта полускальных пород вскрыши. Исследования показывают, что применение гидравлического транспорта полускальных пород резко снизит себестоимость разработки 1 м^3 вскрыши, а производительность труда приблизится к уровню, достигнутому при разработке наносов гидравлическим способом. Проведенный ПО "Кемеровоуголь" анализ показывает, что возможно в период до

Таблица 7

Разрез, гидроотвал	Параметры гидроотвала			Укладываемый го- довой объем, млн. м ³	Способ намыва
	Площадь, га	Макси- мальная высота, м	Объем уложен- ных грун- тов, млн. м ³		
Кедровский					
№ 2	96	24	7,4	0,5–1,4	Сосредоточенный
№ 3	265	52	47,4	1,2–1,3	В течение 13 лет сос- редоточенный, затем рассредоточенный
№ 4	157	38	26,1	3–4	Сосредоточенный
на р. Бусалаиха	96	17	13,5	1–2,2	—"
Краснобродский					
"Новобачатский"	262	25	30	1,2–1,3	—"
"Новоалександ- ровский"	41	23	4	1,2	—"
Им. 50-летия Ок- тября					
"Бековский"	196	49	29	2,5–3	Рассредоточенный
"Свободный"	60	24	4,5	0,5	Сосредоточенный
"Сагарлыкский"	600	45	96	4,5	—"
Черниговский					
№ 1	459	46	67,2	3,1	Рассредоточенный
№ 2	282	61	57,6	2,8	—"
№ 3	329	57	49,9	4,3	—"
Новосергеевский					
"Прямой Ускат"	195	46	37,7	2,4	Сосредоточенный
"Бахтыхта"	98	19	10,2	2,3	—"
Маховский					
на р. Еловка	188	33	25,2	3	Рассредоточенный
№ 1	395	34	40	3–6	Сосредоточенный
№ 18	160	14	13	1,6	—"
Колмогоровский					
на р. Черновой					
Уроп	328	22	23,6	1,2	—"
"Южный"	200	16,5	15,4	2,6	Рассредоточенный
Киселевский					
№ 1	35	32	3,8	0,5	Сосредоточенный
№ 4	63	36	7,5	0,6–0,7	—"
Им. Вахрушева					
"Акташский"	160	59	22,6	1,7–2,5	Рассредоточенный
"Абинский"	35	32	3,6	1,1–1,2	Сосредоточенный
"Листвянский"					
№ 4	70	20	6,2	1,2	—"

1990 г. довести объемы гидровскрыши до 30–35 млн. м³/год. Для расширения области применения гидромеханизации необходимо разработать новые методы и схемы укладки вскрышных пород в гидроотвалы с целью более эффективного использования их вместимости, а также применять

схему совместной укладки намывных глинистых грунтов и полускальных пород вскрыши, разрабатываемых способом гидромеханизации.

Состояние массивов гидроотвалов характеризуется следующими специфическими особенностями:

- перемещением фронта намыва от обвалования к прудку-отстойнику при увеличении мощности техногенного массива;

- формированием техногенных толщ тонкодисперсных грунтов за периоды от нескольких лет до двух-трех десятилетий при интенсивности намыва 1—8 м/год;

- фракционированием грунта при намыве и разнородностью складировемого материала, чем определяется пространственно-временная изменчивость структуры, текстуры, прочностных и деформационных характеристик техногенных отложений;

- концентрацией значительного объема неконсолидированных грунтов во внутренних зонах гидроотвалов, обуславливающей высокую землеемкость этих сооружений и препятствующей последующему использованию намывных территорий после заполнения гидроотвалов.

Главными технологическими функциями хвостохранилищ являются: складирование твердой фазы отходов обогащения;

- необходимое осветление воды и снижение содержания флотореагентов до значений, при которых допустимо использование всего слива хвостохранилища в технологическом процессе;

- создание накопительной емкости для водоснабжения при замкнутом водообороте.

В связи с увеличением отрицательного влияния хвостохранилищ на окружающую среду в условиях неуклонного роста объемов перерабатываемого минерального сырья большое значение приобретают вопросы консервации и рекультивации этих сооружений. При этом первостепенное значение имеют пылеподавление на всех этапах формирования сооружения и обеспечение эффективного вторичного использования хвостов.

Отличительной особенностью формирования хвостохранилищ (по сравнению с гидроотвалами) является преимущественное круглогодичное наращивание намывного массива.

Кроме того, гранулометрический состав хвостов определяется видом минерального сырья и принятой технологией его переработки (более мелкие хвосты характерны, например, для свинцово-цинковых обогатительных фабрик, более крупные — для медно-молибденовых и железорудных), изменяясь в следующей последовательности: мелкозернистые пески — пылеватые пески — супеси — суглинки. Высота хвостохранилищ достигает 150 м и более при интенсивности намыва до 20 м/год (при укладке отходов обогащения в узких каньонах). При перемещении фронта намыва "от дамбы — к пруду" намывной массив создается по принципу обратного фильтра из хвостов. Намыв по схеме "от берега — к дамбе" допустим лишь при заблаговременном возведении ограждающей дамбы на полную высоту из насыпного грунта или вскрышных пород и систематическом контроле состояния откосных сооружений.

Кроме того, особенностями формирования хвостохранилищ по сравнению с гидроотвалами являются требования к замкнутой системе водоснабжения в связи с наличием в отстойном пруду участвующих в обогательном процессе реагентов, что определяется необходимостью создания противифльтрационных экранов. Загрязнение воздушного бассейна и возможная токсичность твердой фазы хвостов обогательных фабрик предприятий цветной металлургии, горнохимического сырья и некоторых других горнодобывающих отраслей определяют необходимость закрепления поверхности хвостохранилищ с применением физических, химических и вегетативных способов.

Частицы отходов обогащения имеют угловатую форму. Коэффициенты неоднородности ($K_H = d_{60} : d_{10}$ — отношение диаметров частиц (мм), меньше которых в материале содержится соответственно 60 и 10 % по массе) хвостов обогательных фабрик цветной и черной металлургии изменяются примерно в пределах (2–40) и (6–75). Гранулометрический состав хвостов также характеризуется средневзвешенным диаметром частиц $d_{ср}$, значения которого (мм) для различных обогательных фабрик составляют: железорудных — $0,08 \div 0,55$; молибденовых — $0,1 \div 0,2$, свинцовых, цинковых, медных — $0,05 \div 0,1$; вольфрамовых — $0,08 \div 0,19$; медно-никелевых — $0,06 \div 0,11$; золотых, серебряных, платиновых — $0,07 \div 0,12$.

Проявление пластических свойств хвостов зависит от содержания глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита, гидрослюда), которое обычно невелико. Сравнительно небольшие объемы (примерно до 10 % от общего объема намывного массива) связанных материалов скапливаются в прудковых зонах хвостохранилищ некоторых железорудных и медно-молибденовых обогательных фабрик. Техногенным отложениям хвостохранилищ и гидроотвалов присуща слоистая текстура, причем толщина квазиизотропных слоев зависит от интенсивности намыва, возраста с увеличением темпов наращивания массива. Неоднородность отложений хвостов в плане определяется раскладкой частиц по крупности по длине пляжа намыва (фракционированием). Слоистостью намывных масс хвостохранилищ и гидроотвалов определяется анизотропия их фильтрационных свойств: коэффициент фильтрации по нормали к поверхности слоев значительно (в 5 раз и более) ниже коэффициента фильтрации по напластованию.

Плотность укладки намывного материала оценивается с помощью показателей плотности при естественной влажности (γ), плотности скелета (γ_s), пористости (n), коэффициента пористости (ϵ). Изменения этих показателей с глубиной связаны с гранулометрическим составом исходного материала, технологией намыва, геометрическими параметрами сооружения, климатическими условиями и т. д. Характеристики водно-физических и механических свойств хвостов рудообогательных фабрик приведены в работах [1, 3, 4, 5, 6].

Опыт безаварийной эксплуатации хвостохранилищ золоторудной промышленности ЮАР обобщен в работе [49]. Значения высоты и угла откоса дамб изменяются соответственно от 10 до 50 м и от 25 до 45° при темпах намыва от 1 до 3 м/год.

Крупные хвостохранилища созданы в Кривбассе, где действуют мощные горно-обогатительные комбинаты. В качестве материала для строительства дамб хвостохранилищ здесь используются скальные породы вскрыши и суглинки. Вместимость хвостохранилищ изменяется в пределах от 124 (ЮГОК, "Балка Войкова") до 489 млн. м³ (СевГОК, "Балка Петрикова").

Планируется организация объединенного отвально-хвостового хозяйства в освободившейся пойме р. Ингулец после отвода ее в новое русло. Проектный объем хвостохранилища составляет 1,591 млрд. м³. Объем ежегодно укладываемых хвостов — 25 млн. м³. Конечная высота дамбы составит 122 м. Намыв производится из торцов пульповодов. Создание объединенного хозяйства позволяет сократить земельный отвод продуктивных селскохозяйственных угодий с 7 до 4 тыс. га. Для повышения плотности укладки хвостов в Кривбассе применяют промежуточные емкости, куда отходы обогащения поступают самотеком, а затем земснарядом с более низким разбавлением хвостов ($T:Ж = 1:8$) перекачиваются в основные хвостохранилища [10].

На хвостохранилищах железорудных горно-обогатительных комбинатов широко применяют отходы обогащения для возведения ограждающих дамб. Ценный опыт круглогодичного формирования дамб наращивания из намывных хвостов обогащения, накопленный на Соколовско-Сарбайском комбинате, обобщен в докладе М.Н. Захарова и других на Всесоюзной научно-технической конференции "Гидромеханизация и проблемы охраны окружающей среды". Безморозный период в районе расположения хвостохранилища составляет 115—120 дней в году. Пульпа со средней консистенцией $T:Ж = 1:17$ подается в хвостохранилище с помощью землесосов по шести стальным пульповодам диаметром 1000 мм тремя подъемами с расходом 10—12 тыс. м³/ч. При температуре выше и ниже -5°C применяют соответственно технологические схемы летнего и зимнего намыва. По схеме летнего намыва основной объем пульпы рассредоточенным способом через короткие выпуски подается на ляж, а пульпа с самыми мелкими фракциями хвостов сбрасывается через концевой выпуск. Схема зимнего намыва предусматривает сброс пульпы из выпусков длиной 30 м с наконечниками, обеспечивающими равномерное покрытие потоком пульпы участка пляжа шириной 100—200 м. Заданная ширина растекания пульпы на пляже фиксируется периодическим включением от одного до пяти коротких выпусков. С учетом необходимости оттаивания участка зимнего намыва на всю глубину и готовности к последующему намыву по летней технологии максимальная толщина слоя намыва в зимний период не превышает 1,0 м. В результате проведенных теплофизических и геомеханических исследований выполнена оценка устойчивости ограждающих дамб с учетом пространственного положения зон промерзания и обоснованы технологические ограничения при зимнем намыве. Внедрение технологии круглогодичного намыва хвостов в ограждающую дамбу позволило исключить использование привозного грунта в объеме 0,5 млн. м³/год.

Таблица 8

Предприятие, хвостохранилище	Способ намыва	Выход хвостов, млн.м ³ /год	Макси- мальная высота дамбы (по про- екту), м	Площадь хвосто- хранили- ща (по проек- ту), га	Вместимость хвостохра- нилища, млн. м ³
Азербайджанский ГОК на р. Каш- кар-Чай	Сосредото- ченный	1,12	74	—53	13,24/10,64
Донской ГОК в логе Акжар	"	0,16	18	180	3,45/1,02
Качканарский ГОК № 1 (Рогалсв- ский отсек)	Комбиниро- ванный	18	55—60	643	271/245
№ 2 (Промежу- точный отсек)	"			484	81/44
Ковдорский ГОК II поле	Рассредото- ченный	6	40	900	240/30,3
Коршуновский ГОК	"	5,6	123	678	168/38,6
Костомукшский ГОК в оз. Кос- томукшское	"	5,2	20	370	410/21,3
Лебединский ГОК в балке Чуфи- чева	Сосредото- ченный	13,7	59	1950	250/130
Лисаковский ГОК	"	2,16	41	1000	220/22
Михайловский ГОК в логе Шама- ровский	Рассредото- ченный	7,8	39	940	131/32,6
Оленегорский ГОК в оз. Хариуское	Сосредоточен- ный (зенит- ный)	3,3	55	1350	400/115
Соколовско-Сар- байский ГОК II отсек	Рассредоточен- ный (летний намыв)	7,5	25	963	104/60
	Сосредоточен- ный (зимний намыв)				
Стойленский ГОК	Сосредоточен- ный	2,8	22	1786	640/8,52
ПО "Чнатурмар- ганец" на р. Гургумела	"	1,7	93	—72	24,3/6,5
Камыш-Бурунский ЖРК					

Продолжение табл. 8

Предприятие, хвостохранилище	Способ намыва	Выход хвостов, млн.м ³ /год	Макси- мальная высота дамбы (по про- екту), м	Площадь хвосто- хранили- ща (по проек- ту), га	Вместимость хвостохра- нилища, млн. м ³
"Верхне-Чурбаш- ское"	"	2,1	15	295	46,3/38
"Нижне-Чур- башское"	"		15	220	26,5/24
Марганецкий ГОК в балке Бабу- рина	"	2,16	36	146	14,8/18
в балке Моро- зова:					
I отсек	"	2,16	34	191	38/6
II отсек	"		34	169	28,4/23
в Марьевском карьере	"	0,65	21	108	14,6/14,4
Орджоникидзев- ский ГОК Чкалов- ская ОФ					
северный отсек	"	3,4	16	135	17/16
южный отсек	"		16	120	17/15,9
Богдановская и Александров- ская ОФ:					
западный отсек	"	1,76	16-18	182	24,2/20
восточный отсек	"		16-18	232	33,2/25
Полтавский ГОК III отсек	Рассредоточен- ный	11,4	26	625	60,5/62
I--II отсеки	"	11,4	26	665	64/46,4
Игулецкий ГОК у с. Николаево	"	12,2	89	558	287,3/252,9
Северный ГОК в балке Петри- кова	Сосредото- ченный	18,2	72	1470	489/281,6
Ново-Криворож- ский ГОК у с. Миролю- бовка	Рассредото- ченный	9,2	50	552	124,8/85,2
Объединение ЮГОКа--НКГОКа (I и IV карты)	"	20,2	76	836	394,5/240
Южный ГОК у с. Войково	Комбиниро- ванный	11	57	600	124/103
Центральный ГОК в балке Лозо- ватка	"	9,5	64	1652	473,4/196,5

Примечание. В числителе -- по проекту, в знаменателе -- уложенный объем на конец 1986 г.

Характеристика хвостохранилищ железорудных горно-обогатительных комбинатов дана в табл. 8 по данным ВИОГЕМа (М.М. Гринман) с некоторыми дополнениями.

На большинстве предприятий дамбы наращивания возводятся эксплуатационной службой из хвостов в процессе их гидроукладки и реже — подрядными организациями. На ГОКах Кривбасса для наращивания дамбы ярусами высотой 4—5 м используются скальные вскрышные породы. Хвостохранилища преимущественно намывные. К наливному типу относятся хвостохранилища Донского, Марганецкого, Орджоникидзевского, Полтавского (III отсек), Костомукшского, Центрального ГОКов и ПО "Чиатурмаргеней".

На Марганецком ГОКе хвостохранилище в балке Бабурина используется в качестве буферной емкости. Превышение проектной вместимости достигнуто за счет поднятия пляжа на 7 м по сравнению с проектом.

На Орджоникидзевском ГОКе ведется строительство новой карты на отвалах Алексеевского карьера. Хвосты складировются в выездную траншею.

Хвостохранилища песчано-гравийных карьеров предназначаются для гидравлического складирования поступающих с дробильно-сортировочных фабрик песков, часть которых затем отгружается потребителям. Собственно хвостами являются глинистые пески. Годовые объемы укладки в хвостохранилища материала не превышают 1,5—2 млн. м³. Высота хвостохранилищ равнинного типа достигает 50 м (Вяземский ГОК). Дамбы первичного обвалования высотой до 10 м сооружаются из глинистых грунтов. Намыв осуществляется преимущественно сосредоточенным способом из торцов пульповодов. Аварии хвостохранилищ происходили главным образом вследствие выхода из строя водосбросной системы (заиления шандорных колодцев, дренажных труб и канав), а также деформаций глинистых дамб в связи с их строительством из слабоуплотненных грунтов. Мероприятия по контролю за состоянием этих намывных сооружений выполняются в минимальном объеме и включают лишь периодическую топочемку, определения гранулометрического состава песков и их простейших водно-физических характеристик.

Анализ опыта эксплуатации хвостохранилищ и гидроотвалов на предприятиях различных отраслей горнодобывающей промышленности позволяет отметить следующие основные тенденции современной технологии возведения этих гидросооружений:

направленное изменение состояния намывного массива и условий устойчивости дамб в основном осуществляется применением способа и порядка намыва, обеспечивающих повышение плотности укладки материала и необходимое удаление прудка от гребня дамбы;

конструкция и способ возведения дамбы во многих случаях устанавливаются на основе данных инженерно-геологических изысканий, состав и объем которых недостаточны для прогноза деформаций и оценки устойчивости дамб;

практически не контролируется состояние внутренних зон (50–80 % общей площади), и поэтому возникают затруднения в решении вопросов наращивания гидросооружений и последующего использования их территорий, а также корректировки технологии намывных работ для повышения их эффективности и безопасности.

1.3. НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

Улучшение экономических показателей гидравлического складирования достигается за счет максимального использования овражно-балочной сети для размещения вскрышных пород и отходов обогащения, повышения плотности укладки намывных материалов, а также увеличения высоты и соответственно вместимости сооружений. При обеспечении устойчивости откосов ограждающих дамб существенное значение имеют подготовка слабых оснований (представленных почвенно-растительным слоем, торфом, илистым суглинком и т. п.), технологические схемы намыва, баланс складироваемых материалов, мероприятия по дренажу и механическому удержанию породных масс. Повышение вместимости сооружений можно достигнуть путем увеличения высоты ограждающих дамб при одновременной пригрузке низовых откосов, выполаживания и террасирования откосов, механического укрепления их или на основе направленного изменения состояния намывных массивов для повышения плотности укладки складироваемых материалов. Первая группа способов применяется без изменения технологии намыва, вторая предусматривает осуществление технологического и специального воздействия на намывной массив.

Существенными недостатками первой группы способов, ограничивающими их широкое применение, являются значительные объемы работ по доставке материалов для возведения дополнительных дамб или контрбанкетов, привлечение оборудования, не используемого в основном технологическом процессе гидравлического складирования, дополнительные затраты людских и материальных ресурсов, невозможность быстрого использования территорий высоких заполненных гидроотвалов.

Для формирования намывных упорных призм из крупнозернистого материала применяют отдельный способ намыва с сопутным использованием естественной классификации материала в пульпопроводе или применением специальных классификаторов. Различные вариации этого способа нашли применение при возведении хвостохранилищ и могут быть также использованы в практике гидроотвалообразования для отмыва песчаных частиц из супесчаных и суглинистых грунтов.

При использовании естественной классификации материала сброс пульпы из распределительного пульпопровода производится через донные выпуски небольшого сечения. Распределительный пульповод размещается на дамбе по ее продольной оси (рис. 4, а). Число одновременно работающих выпусков на пульповоде устанавливается из условия

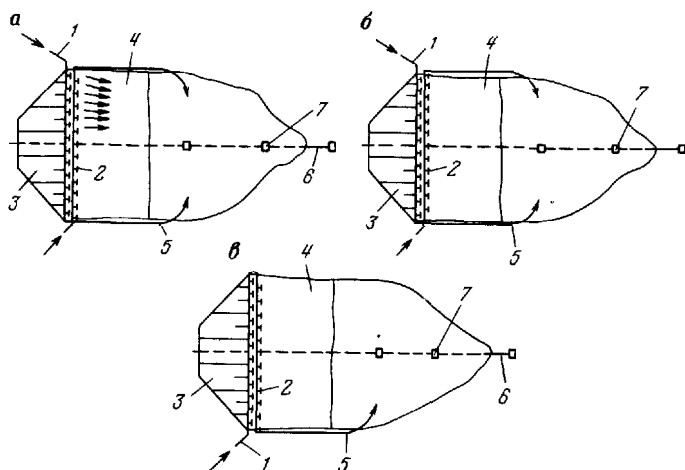


Рис. 4. Схемы раздельного намыва хвостохранилищ:

1 — распределительный пульповод; 2 — доимые выпуски для отбора крупных фракций хвостов; 3 — пионерное обвалование; 4 — отложения крупных фракций хвостов в пляжной зоне; 5 — ответвление пульповода для сброса тонких фракций в прудок; 6 — отводящий коллектор; 7 — сбросный колодец

сброса через них лишь крупных фракций и обеспечения уклона намыва не менее 0,02—0,03. Для улучшения естественного фракционирования материала по длине откоса намыва используют поперечные выпуски от распределительного пульповода. При небольшом фронте намыва (например, при создании хвостохранилищ в узких каньонах или оврагах) и значительном расходе пульпы возникает необходимость увеличения числа выпусков и их диаметров, что приводит к размыву пляжной зоны. Неизбежное продольное фракционирование грунта обуславливает снижение надежности сооружения. Для устранения этих недостатков АрмНИИПромцветом предложен способ возведения намывного сооружения (А.С. № 812875), обеспечивающий более равномерное распределение песчаных частиц различной крупности по фронту намыва за счет одновременного рассредоточенного выпуска пульпы из основного и дополнительного пульповодов, подача пульпы в которые производится в различных направлениях. Варианты этой схемы намыва показаны на рис. 4, б, в.

На хвостохранилищах некоторых обогатительных фабрик дамбы обвалования создаются намывом из крупных фракций хвостов, отделяемых в гидроциклонах. На ряде горно-обогатительных предприятий (ГОКи Кривбасса, Марганецкий, Орджоникидзевский, Михайловский) используются промежуточные аккумулирующие емкости, где происходит предварительный отмыв наиболее мелких фракций. Из промежуточных емкостей сгущенная пульпа перекачивается в основное хранилище. На основании анализа технико-экономических показателей системы удаления и складирования хвостов установлена целесообразность предварительного

сгущения пульпы на радиальных отстойниках вблизи обогатительной фабрики и гидротранспортирования сгущенной пульпы в хвостохранилище со следующими показателями ее консистенции (при подаче пульпы до 50 тыс. м³/ч): — при дальности транспортирования L до 4 км — сгущение в одну ступень (без коагулянтов) до $T:Ж = 1:5$; при $L > 4$ км — сгущение до $T:Ж = 1.3,5 \div 1:2$ (с коагулянтами).

Уменьшение строительных объемов ограждающих дамб в 50 раз и более, расхода перекачиваемой пульпы и оборотной воды в 10–15 раз достигается созданием конусообразных хвостохранилищ при центральной подаче сгущенных хвостов с содержанием твердого в пульпе не менее 30 %. Однако существенными недостатками центрального намыва сгущенных хвостов являются чрезмерное загрязнение воздушного бассейна пылящими минеральными частицами и сложность рекультивации зашламованных участков [10].

Способы направленного воздействия на намывные массивы тонкодисперсных намывных грунтов (для гидроотвалов вскрышных пород и прудковых зон некоторых хвостохранилищ) в зависимости от вида используемых физических полей могут быть разделены на следующие группы: электромагнитные; электрохимические; термические; гравитационные.

Сущность *электромагнитного* способа заключается в интенсификации процессов взаимодействия глинистых частиц, ионов и диполей воды поровых растворов водонасыщенных глинистых грунтов при приложении к ним магнитного поля. Действие магнитного поля сказывается на увеличении хаотичности движения глинистых частиц, что повышает вероятность столкновения и вызывает дополнительную их коагуляцию. Калининским политехническим институтом на гидроотвале "Березовый Лог" выполнены исследования влияния магнитного поля на процессы осаждения мелких частиц меловых грунтов из пульпы и плотность осадка [11]. Исследования проводили на двух картах с размерами в плане 100х100 м. В качестве возбудителя магнитного поля использовали пятисекционный аппарат трансформаторного типа с расходом по пульпе 250 м³/ч. Скорость осаждения частиц на контрольной карте (без магнитной обработки) составила 2,48 см/мин, на опытной — 4,67 см/мин, т. е. увеличение скорости осаждения минеральных частиц пульпы, подвергающейся магнитной обработке, составило 88,3 %. Скорость понижения уровня воды на картах после прекращения намыва за счет фильтрации и испарения в среднем составила: на опытной карте 2,88 мм/ч, на контрольной — 1,88 мм/ч. Увеличение водопроницаемости грунта на опытной карте возможно за счет агрегации минеральных частиц. На контрольной карте меньшая скорость осаждения приводит к отложению тонкодисперсных частиц на откосах дамб обвалования, что ухудшает фильтрацию. Также установлено, что при сбросе осветленной воды через водосбросные колодцы после магнитной обработки количество сбрасываемого грунта уменьшается на 35,3 %.

В начальный период после магнитной обработки пульпы наблюдается рост показателей водоотдачи и плотности грунтов, однако в дальнейшем

различия этих показателей для контрольной и опытной (данные приведены в скобках) карт становятся незначительными.

Период после намыва, ч	24	600
Относительная влажность, %	117 (96)	60,8 (55)
Плотность, г/см ³	1,166 (1,256)	1,668 (1,724)

Магнитная обработка пульпы увеличивает скорость осаждения мелких частиц пульпы, что позволяет сократить путь движения от выброса пульпы до сброса осветленной воды, т. е. уменьшить размеры пруда-отстойника, а также сброс мелких частиц через водосбросный колодец, заиливание отстойника и износ оборудования насосных станций оборотного водоснабжения. Однако уменьшение интенсивности водоотдачи и уплотнения после прекращения намыва может привести к отрицательным результатам в связи с уменьшением несущей способности массива и увеличением продолжительности периода "отдыха" намывных территорий, предшествующего их сдаче для последующего народнохозяйственного использования.

Сущность *электрохимических* способов заключается в воздействии на водонасыщенные глинистые грунты (супеси и суглинки) постоянного электрического поля, вызывающего в них явление электропереноса — направленного перемещения между разноименными полюсами частиц — носителей электрического заряда (ионов, дисперсных частиц и молекул воды). Перемещение диполей воды в прикатодное пространство, необратимые изменения в составе и структуре грунтов обуславливают их последующее упрочнение. Область применения электрохимического способа укрепления — грунты с коэффициентом фильтрации $0,001 < K_f < 0,01$ м/сут, для которых содержание пылеватых частиц размером 0,005–0,05 мм должно быть не ниже 20–25 %, а содержание глинистых частиц размером 0,005 мм — не менее 10 %. Для укрепления массива используют неоднородное электрическое поле, силовые линии которого сгущаются к катоду. Это достигается в результате концентрического расположения анодов вокруг общего катода. Упрочняемый объем грунтов приобретает форму цилиндрической сваи, радиус которой равен расстоянию между разноименными электродами. Натурные эксперименты по электрохимическому закреплению намытых песчано-глинистых грунтов пляжной зоны проводились Государственным институтом горно-химического сырья на гидроотвале Роздольского горно-химического комбината. На обработку 1 м³ сваи расходовали 20 кВт·ч электроэнергии. Всего обработано 16 тыс. м³ грунта [12].

Метод электрохимического закрепления в связи с его высокой энергоемкостью пригоден для упрочнения ограниченных (до нескольких десятков тысяч кубометров) объемов песчано-глинистых грунтов пляжных зон гидроотвалов.

В качестве *термического* метода может рассматриваться подсушка намытых пород на картах. Тонкодисперсные грунты намываются под защитой упорных призм, отсыпаемых заранее из хорошо фильтрующего песчаного, гравелистого и гравелисто-галечникового грунта. На гидро-

отвале "Березовый Лог" для рекультивации на песчаную подушку намывали защитные слои суглинка мощностью до 1 м. Продолжительность периода, по истечении которого обеспечивается проходимость рекультивационного оборудования на гусеничном ходу, составила 50–70 сут. Известны также способы одностороннего намыва сооружений распластанного профиля. При этом содержание глинистых и пылеватых частиц не должно превышать 30–40 %. Использование естественной сушки для обезвоживания слоев намытого глинистого грунта малой мощности эффективно в районах с засушливым климатом. Для условий Средней Азии ВНИИГиМ разработан способ интенсификации обезвоживания намытых грунтов при возведении сооружений из лёссовидных суглинков. Сущность способа заключается в использовании естественной сушки и влагообмена для обезвоживания и уплотнения путем послойного устройства продольных отвалов грунта с рассредоточенной подачей пульпы между ними. Интенсификация обезвоживания и уплотнения намытого грунта происходит в результате влагообмена его с сухим грунтом отвалов, испарения влаги с их гребней. За каждым земснарядом закрепляется три карты. На первой карте производится намыв, на второй — сушка намытого грунта и на третьей — устройство отвалов и их сушка. Мощность слоя намытого грунта составляет 0,7–0,8 м [13].

При малой ширине карты намыва ВНИИГиМ предложен комбинированный способ. Устраняются продольные карты, в конце которых устанавливается водосбросный колодец. После сброса осветленной воды экскаватором-драглайном производится отсыпка слоя сухого грунта на намытый грунт. Грунт отсыпается с двух противоположных сторон карты из заранее подготовленных резервов, расположенных вдоль продольных дамб обвалования. Обезвоживание и уплотнение намытого грунта происходит вследствие влагообмена между намытым и сухим грунтом при одновременном испарении влаги. Слой отсыпанного грунта препятствует образованию в намытом грунте плотной пересушенной корки и способствует капиллярному подъему избыточной влаги с намытого грунта к сухому. Для намыва используется земснаряд производительностью по грунту не более 100 м³/ч. Намыв ведется низкоопорным способом на высоту, равную мощности слоя намыва 1 м. После намыва сбрасывается осветленная вода и отсыпается слой сухого грунта толщиной 0,1–0,2 м. За каждым земснарядом закрепляется три карты. Пока на первой карте идет намыв, на второй — создается резерв сухого грунта и на третьей — производятся отсыпка и естественная сушка намытого грунта. Плотность скелета уложенных описанными способами грунтов составляет 1,52–1,54 т/м³, а время их обезвоживания при этом сокращается в 2 раза. Применение естественной сушки для обезвоживания намытого глинистого грунта возможно в районах с засушливым климатом при малой мощности намываемого слоя и низкой производительности применяемого оборудования.

Гравитационные методы включают: сгущение пульпы для изменения соотношения размеров внутренних зон гидроотвалов; послойный намыв грунтов различной водопроницаемости в ядерной зоне; создание в раз-

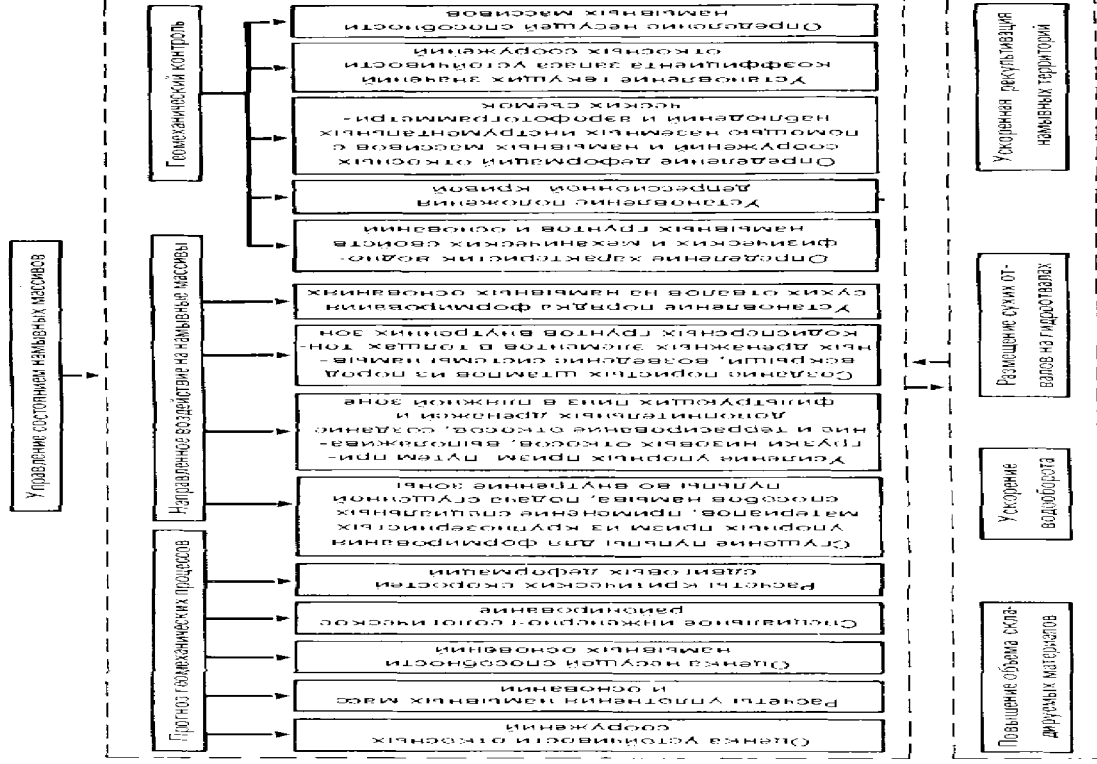


Рис. 5. Структурная схема управления намываемых массивов

личных зонах гидроотвалов из намывных и насыпных фильтрующих материалов системы гидравлически связанных дренажных элементов, уплотняющих тонкодисперсные грунты и отводящих отжимаемую из них воду. Методы этой группы являются наиболее эффективными с учетом реальных объемов гидравлической укладке тонкодисперсных грунтов (1–20 млн. м³ в год) и геометрических параметров гидроотвалов. Универсальность гравитационных методов обусловливается возможностью использования основного оборудования для намывных работ.

Составленная с учетом рассмотренных положений структурная схема управления намывными массивами представлена на рис. 5. В качестве неотъемлемого элемента управления применяется оперативный контроль на всех стадиях формирования намывных сооружений и последующего использования их территорий.

ГЛАВА II

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НАМЫВНЫХ МАССИВАХ И ИХ ОСНОВАНИЯХ

II.1. КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРИЙ КОНСОЛИДАЦИИ И ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОВ

При формировании намывных массивов из тонкодисперсных материалов или при наличии в их основаниях глинистых грунтов поведение системы "сооружение — основание" определяется характером процессов уплотнения и развития сдвиговых деформаций. Деформации раздельнозернистых материалов (естественных песчано-гравийных или отходов обогащения полезных ископаемых) связаны с перегруппировкой частиц и часто носят необратимый характер. Такие грунты быстро уплотняются вслед за приложением нагрузок. В связи с отсутствием связей между минеральными составляющими раздельнозернистые грунты подвержены различным фильтрационным деформациям и могут обладать "плывунными" свойствами.

Существуют принципиальные различия в механизме изменения напряженно-деформированного состояния для квазиоднофазных и многофазных глинистых грунтов. Если по условиям работы сооружений дренаж поровой жидкости в водонасыщенном грунте невозможен или степень водонасыщения невелика, то грунт может рассматриваться как квазиоднофазный (к квазиоднофазным относятся также мерзлые породы). Деформирование квазиоднофазных глинистых грунтов рассматривается как результат проявления реологических свойств грунта в целом.

Для многофазных глинистых грунтов процесс деформирования определяется физико-механическими свойствами отдельных фаз и характером их взаимодействия. В этом случае интенсивность изменения соотноше-

ния фаз в единице объема зависит от геометрических размеров деформируемой области. Виды уравнений состояния определяются для каждой фазы отдельно (в условиях их невзаимодействия).

Деформации раздельнозернистых грунтов связаны с перегруппировкой частиц и носят необратимый характер. Уплотнение происходит вслед за приложением нагрузки, что позволяет при прогнозных расчетах для любого момента времени принимать максимальные значения осадок.

К числу значительных работ по реологии квазиоднофазных пород следует отнести труды С.С. Вялова, М.Н. Гольдштейна, Ж.С. Ержанова, Н.Н. Маслова, С.Р. Месчяна, Г.И. Покровского, А.С. Строганова.

Различают два основных подхода: с использованием общих закономерностей деформирования пород и с применением реологических моделей. Наиболее полной и общей является теория наследственной ползучести, которая учитывает предысторию нагружения горной породы при оценке ее действительного состояния.

Линейные реологические модели являются частными случаями, вытекающими из теории наследственной ползучести. Наряду с упомянутой общей теорией используются также теории, учитывающие структурные изменения грунтов в процессе их деформирования.

Ю.К. Зарецким предложены общие реологические уравнения состояния квазиоднофазных грунтов, физическое обоснование которых дано им в совместной работе с С.С. Вяловым, посвященной вопросам структурной механики грунтов. Детальный анализ вопросов ползучести и консолидации квазиоднофазных и многофазных грунтов приведен в работах Ю.К. Зарецкого, Л. Шукле и С.С. Вялова, наиболее широко освещающих состояние проблемы.

В связи с задачами обеспечения долговременной устойчивости карьерных откосов большое значение приобретают вопросы длительной прочности (сдвиговой ползучести). Как отмечает Л. Шукле, трехосные испытания, выполненные различными исследователями, отличаются противоречивыми данными относительно влияния длительности испытаний на величину критической деформации.

Н.М. Гольдштейн объясняет различие результатов частичным восстановлением межчастичных связей в условиях медленно нарастающей деформации. При этом интенсивность процесса деформирования определяется физико-химической природой структурных связей. Сопротивление сдвигу глинистых пород во времени, по Н.Н. Маслову:

$$S_T = P \operatorname{tg} \varphi_T + C_T, \quad (II.1)$$

где φ_T и C_T — соответственно угол внутреннего трения и общее сопротивление грунта при его плотности — влажности, достигнутой под нагрузкой P за время T .

При этом общее сцепление

$$C_{w\epsilon} = \Sigma w_{\epsilon} + C_c.$$

Согласно Н.Н. Маслову, прогрессирующее падение прочности жестких глинистых пород при их деформации во времени объясняется нарастаю-

щим разрывом хрупких связей структурного сцепления (C_c). Связность глинистых пород (Σ_{we}), обуславливающая их пластичность и реологические свойства, может даже возрастать во времени при уплотнении породы и вследствие коллоидных процессов тиксотропии и синерезиса.

Консолидацией (уплотнением) породы называется процесс более плотной укладки минеральных частиц под влиянием какой-либо нагрузки, сопровождающийся уменьшением пористости-влажности и увеличением плотности породы. При уплотнении водонасыщенной глинистой породы в поровой воде возникает избыточное давление, называемое поровым.

Сопротивление сдвигу на любой площадке:

$$\tau = C' + (\sigma_n - P_n) \operatorname{tg} \varphi', \quad (\text{II.2})$$

где C' и φ' — соответственно сцепление и угол внутреннего трения для консолидированной породы (определены по эффективным напряжениям); σ_n — полное нормальное напряжение; P_n — поровое давление.

Как видно из выражения (II.2), по мере уплотнения и уменьшения давления в поровой воде сопротивление сдвигу возрастает, приближаясь к величине сопротивления полностью стабилизированной породы. Этим обстоятельством в значительной мере объясняется практический интерес к определению максимальной величины порового давления и исследованию изменений его во времени. Характер уплотнения глинистой породы существенно изменяется, если в порах имеется заземленный воздух. Наличие вязкого трения (ползучести минерального скелета) и газообразной составляющей, обладающей демпфирующими свойствами, существенно снижает величину порового давления и увеличивает долю вторичной консолидации в общей осадке. Содержание в водонасыщенной породе 5 % заземленного воздуха от общего объема пор может снизить величину порового давления на 30–40 %. Роль ползучести минерального скелета возрастает с увеличением плотности.

Основные направления теории консолидации:

рассматривающие процесс уплотнения двухфазного грунта как результат отфильтровывания воды из пор под действием нагрузки (фильтрационная или "первичная", консолидация); изучающие вопросы консолидации двух- и трехфазных грунтов, учитывающие влияние на процесс уплотнения реологических свойств скелета, сжимаемости поровой жидкости, вязкости связанной воды, а также взаимодействие фаз.

Существующие теории отличаются друг от друга полнотой описания уравнений состояния грунта, характера взаимодействия отдельных фаз грунта, определяющего формы связи между напряжениями и деформациями грунтовой системы, и закономерностей отношения фаз в единице объема в процессе консолидации.

Первые решения теории уплотнения двухфазной земляной среды в постановке одномерной задачи были получены К. Терцаги и Н.М. Герсевановым. Д.Е. Польшиным найдено решение о начальном распределении напряжений в полностью водонасыщенном основании после приложения равномерно распределенной полосовой нагрузки (плоская задача) и осуществлена постановка пространственной задачи.

В.А. Флориным при обобщении одномерной задачи на трехмерный случай предложена "основная модель", базирующаяся на принципе гидроемкости Н.М. Герсевича и принципе постоянства в процессе уплотнения полных напряжений, которые принимаются равными напряжениям после окончания уплотнения породы под действующими нагрузками. Для учета объемных сил используется модель "объемных сил" Флорина — Био; теория, основанная на этой модели, рассматривается как развитие теории фильтрационной консолидации, использующей "основную модель". Модель "объемных сил" рассматривается в работах Тан Тьонг Ки, Гибсона, Мандела, В.Н. Николаевского, Ю.К. Зарецкого. Наибольшей полнотой отличается предложенная Ю.К. Зарецким теория, основные выводы которой подтверждаются данными экспериментов. Деформирование во времени многофазного грунта рассматривается Ю.К. Зарецким как результат одновременного развития процесса формоизменения (сдвига) во времени "скелета" грунта и процесса изменения объема. При этом развитие первого процесса объясняется деформированием вязких связей между минеральными частицами, второго — взаимным перемещением фаз грунта и объемными деформациями скелета грунта.

Если по теории Терцаги — Герсевича компрессионная зависимость (без учета ползучести скелета) записывается в виде

$$\epsilon_0 - \epsilon = a_k q - a_k P_n, \quad (II.3)$$

то, по Ю.К. Зарецкому,

$$\epsilon_0 - \epsilon = a q - \frac{a}{\beta} P_n, \quad (II.4)$$

где ϵ_0 , ϵ — значения коэффициента пористости соответственно начальное и при внешней уплотняющей нагрузке; P_n — поровое давление; a — коэффициент сжимаемости при компрессии.

По Ю.К. Зарецкому, раздвижка минеральных частиц происходит в общем случае с другим модулем деформации (β/a). При $\beta = 1$ получается компрессионная зависимость в формулировке Терцаги — Герсевича. Коэффициент β рассматривается как отношение модулей объемной деформации уплотнения и разрушения. По коэффициенту β также оценивается часть внешнего давления, воспринимаемого в начальный момент времени ($t = 0$) поровой водой.

Принятая Ю.К. Зарецким обобщенная модель объемных сил Флорина — Био учитывает переменность коэффициента Пуассона, внутриобъемное набухание грунтов и ползучесть скелета грунта с использованием теории наследственной ползучести. Общие уравнения трехмерной консолидации многофазных грунтов с учетом ползучести скелета, полученные Ю.К. Зарецким, включают как частные случаи теории ползучести грунтов В.А. Флорина и Тн Тьонг Ки.

Для прогноза уплотнения сложенных глинистыми грунтами дамб и их оснований значительный интерес представляют решения задач консолидации и ползучести многофазных грунтов, полученные Н.А. Цытовичем.

чем и З.Г. Тер-Мартirosяном на основе обобщения результатов многолетних теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых [14]. В качестве основной рассматривалась механическая модель многофазного грунта, состоящего из упруговязкого грунта и газосодержащей сжимаемой поровой жидкости. Модель удовлетворяет принципам эффективных напряжений Терцаги, ламинарной фильтрации Дарси, сжимаемой жидкости Лейбензона и наследственной ползучести Больцмана. Уравнение консолидации многофазного грунта представляется в виде:

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + n m_v \frac{\partial P_{\text{и}}}{\partial t} = \frac{K_{\text{ф}}}{\gamma_{\text{в}}} \nabla^2 P_{\text{и}}, \quad (\text{II.5})$$

где ϵ_v — объемная деформация; n — пористость; m_v — коэффициент объемной сжимаемости поровой жидкости; $K_{\text{ф}}$ — коэффициент фильтрации; $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды; ∇^2 — оператор Лапласа.

При решении уравнения (II.5) используются допущения о линейной зависимости деформирования скелета и поровой жидкости соответственно от эффективных напряжений и порового давления и о неизменности суммы главных тотальных напряжений в процессе консолидации.

Для оценки начального напряженного состояния массива многофазного грунта под воздействием внешней нагрузки применительно к решению плоской и пространственной задач консолидации З.Г. Тер-Мартirosяном предложен метод приведенного модуля, в соответствии с которым многофазный грунт в начальный момент нагружения характеризуется единым модулем деформации и единым коэффициентом Пуассона. На рис. 6 дается сопоставление расчетных (по решениям одномерной задачи фильтрационной консолидации Терцаги — Герсеванова — 1, по решению Флорина с учетом ползучести скелета — 2, по формуле Тер-Мартirosяна — 3) и экспериментальной (4) зависимости $P_{\text{и}}$ и (t) образца саратовской глины высотой 4 см при давлении 0,2 МПа. Из рис. 6 видно, что результаты эксперимента (кривая 4) наилучшим образом описываются при одновременном учете ползучести и сжимаемости поровой жидкости (кривая 3) [14].

Намывные тонкодисперсные грунты внутренних зон гидроотвалов и некоторых хвостохранилищ относятся к группе слабых водонасыщенных грунтов, для которых значение модуля деформации не превышает 5 МПа, а степень водонасыщения — больше 0,8. Наиболее представительные исследования слабых водонасыщенных глинистых грунтов в условиях их естественного залегания выполнены М.Ю. Абе-

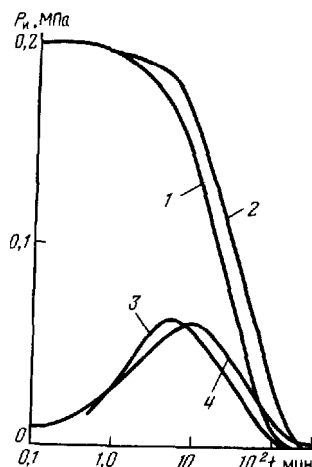


Рис. 6. Зависимость порового давления ($P_{\text{и}}$) от времени (t) для образца саратовской глины (по З.Г. Тер-Мартirosяну)

левым, которым дан анализ методов расчета консолидации этих грунтов и предложены инженерные методы расчета осадок и порового давления для оснований при устройстве песчаных подушек, вертикальных цилиндрических дрен и дренажных прорезей. В зависимостях М.Ю. Абелева учитываются структурная прочность грунтов и начальный градиент напора [15].

Для прогноза сдвиговых деформаций сложенных глинистыми грунтами откосных сооружений гидроотвалов и хвостохранилищ целесообразно использовать теоретический аппарат структурной механики грунтов [16]. В соответствии со структурно-механическими представлениями деформирование глинистых пород обусловлено нарушением связей между минеральными частицами и переориентацией этих частиц в направлении сдвига. При действующем по вероятной поверхности скольжения сдвигающем напряжении, превышающем предельно длительное сопротивление сдвигу, происходит развитие микротрещин, снижается прочность пород и возникают незатухающие сдвиговые деформации (ползучесть). Сдвиговые деформации и прочность глинистых пород откосных сооружений соответственно являются интегральной функцией специального вида и дробно-линейной функцией времени существования откосов.

Теоретические исследования в области уплотнения и сдвиговой ползучести грунтов обеспечили получение многочисленных аналитических решений. Однако эти решения, несмотря на их теоретическую строгость в пределах поставленных задач, не всегда обеспечивают надежный прогноз состояния намывных массивов по следующим причинам:

- ввиду трудности аналитического описания процессов уплотнения намывных толщ для всех стадий формирования техногенных массивов с учетом специфики возведения гидроотвалов и хвостохранилищ;

- вследствие трудоемкости преимущественно лабораторных методов определения многочисленных исходных показателей;

- ввиду недостаточной разработки методов натурного определения деформационных характеристик намывных грунтов.

11.2. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА УПЛОТНЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАСС

Для практических расчетов уплотнения преимущественно применяют решения одномерных задач. Решение плоской задачи может быть использовано как "эталонное" при оценке пригодности одномерных задач для расчетов уплотнения оснований упорных призм и толщ намывных тонкодисперсных грунтов.

Решения плоской задачи фильтрационной консолидации двухфазных пород рассматривались преимущественно для полубесконечных массивов, нагруженных сосредоточенной силой, полосовой и полубесконечной нагрузками. При расчетах уплотнения сжимаемая толща учитывалась путем рассмотрения деформации слоя, выделенного из однородного полупространства. Очевидно, картина деформаций в пределах сжимаемой толщи существенно меняется в случае предположения залегания на некоторой глубине несжимаемой части основания.

Уравнение уплотнения двухфазной среды для плоской задачи может быть представлено следующим образом:

$$C_v \left(\frac{\partial^2 P_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_{II}}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial P_{II}}{\partial t}, \quad (II.6)$$

где C_v — коэффициент консолидации; P_{II} — поровое давление.

В работе [17] решение уравнения (II.6) для слоя конечной мощности представлено в виде:

$$P_{II} = \int_D \sigma_0(x', z') G(x, x', z, z') dx' dz', \quad (II.7)$$

где $\sigma_0(x', z')$ — начальная величина давления в поровой воде.

При представлении функции Грина $G(x, x', z, z')$ в виде произведения функции Грина для бесконечного $G(x, x')$ и ограниченного $G(z, z')$ стержней

$$P_{II} = \frac{1}{h\sqrt{\pi C_v t}} \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_0^h \sigma_0(x', z') \left\{ \exp \left[-\frac{(x - x')^2}{4 C_v t} \right] \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1, 3, 5 \dots} \sin \frac{i\pi z'}{h} \sin \frac{i\pi z}{h} \exp \left[-\left(\frac{i\pi}{h} \right)^2 C_v t \right] \right\} dz', \quad (II.8)$$

где $h = 2d$, $d = m/2$ и $d = m$ соответственно при двустороннем и одностороннем дренировании слоя мощностью m .

Приняв σ_0 не зависящим от x' и z' и проинтегрировав выражение (II.8) по этим переменным, получаем известную формулу для определения порового давления в условиях одномерной задачи. Начальная величина порового давления для условий плоской задачи определялась с использованием решения аналогичной задачи теории упругости в интерпретации К.Е. Егорова, производившего расчеты деформаций и напряжений для случая загрузки основания равномерно распределенной полосовой нагрузкой.

После интегрирования выражения (II.8) по x' и z' были получены расчетные формулы для определения порового давления в слое, нагружаемом мгновенно прикладываемыми равномерно распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой и постепенно возрастающей нагрузкой. Поровое давление при постепенно возрастающей нагрузке определялось путем дополнительного интегрирования выражений для случая, когда нагрузка прикладывалась мгновенно.

Решения получены для двух задач, различающихся по условиям на контактной поверхности. Первая задача соответствует условию отсутствия касательных напряжений на нижней поверхности слоя (случай скольжения слоя); вторая задача рассматривалась при условии отсутствия горизонтальных смещений на этой поверхности (случай прилипания слоя). Общим условием обеих задач является отсутствие вертикальных перемещений на нижней контактной поверхности.

Величины порового давления, определенные для условий одномерной и плоской (случай полубесконечного массива) задач, сопоставлялись с

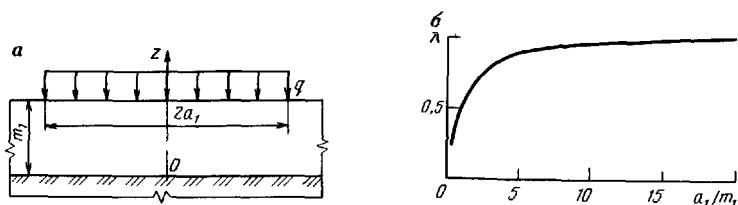


Рис. 7. Расчетная схема слоя конечной мощности в условиях плоской задачи (а) и зависимость λ от отношения a_1/m_1 (б)

результатами расчетов по формулам плоской задачи уплотнения слоя конечной мощности. Расчеты $P_{\text{и}}$ для первой ($z = 0, \tau = 0$) и второй ($z = 0, u = v = 0$) задач дали результаты, отличающиеся незначительно (примерно на 10 %). Поэтому основной объем вычислений выполнялся с использованием менее громоздких формул для первой задачи.

Сопоставление данных одномерной задачи с результатами расчетов порового давления для слоя мощностью m_1 , загруженного равномерно распределенной нагрузкой q на полосе шириной $2a_1$ (рис. 7, а), позволило установить, что для середины полосы сходимость значений порового давления тем лучше, чем больше отношение a_1/m_1 .

Построен график зависимости $\lambda = f(a/m_1)$ (рис. 7, б), где $\lambda \leq 1$ — коэффициент перехода от плоской к одномерной задаче — отношение площадей эпюр порового давления (при $C_v t = 0 \div 10$).

Таким образом, выявление характера зависимости $\lambda = f(a_1/m_1)$ позволяет установить пределы применимости одномерной задачи ($\lambda \approx 1$ при $2a_1/m_1 \geq 10$) для инженерных расчетов уплотнения бортовых и отвальных массивов.

При формировании гидроотвалов из тонкодисперсных грунтов создаются условия для возникновения весьма значительного избыточного порового давления. В слоях большой мощности, сложенных грунтами с низкими фильтрационными характеристиками, рассеивание порового давления протекает очень медленно, что и следует учитывать при назначении темпов отвалообразования. При формировании многослойных отвалов целесообразно выбирать рациональное чередование слабофильтрующих и дренирующих слоев, исходя из условия максимально возможного уплотнения глинистых слоев и увеличения приемной способности гидроотвала.

Использование решений задач консолидации позволяет определять осадки породных масс и производить оценку устойчивости намывных сооружений, исходя из прочности неконсолидированных грунтов их тела и основания.

С учетом значительных размеров гидроотвалов в плане для определения давлений в поровой воде и осадок породных слоев вполне допустимо использование решений одномерных задач уплотнения. Теория фильтрационной консолидации применима в основном для полностью водонасы-

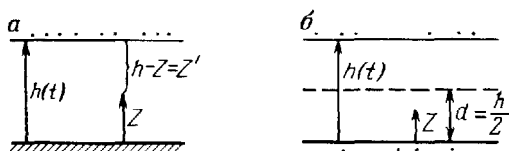


Рис. 8. Расчетные схемы уплотнения слоя переменной мощности на водоупоре (а) и на дренаже (б)

щенных бесструктурных грунтов, к числу которых и относятся породные массы гидроотвалов. При изменении граничных условий данная теория может быть также использована для водонасыщенных грунтов, содержащих незначительное количество воздуха и обладающих структурными свойствами.

Учитывая специфику формирования гидроотвалов, рассмотрим следующие случаи уплотнения слоя пород:

переменной мощности, возрастающей во времени (случай намыва);
после окончания намыва под действием собственной массы слагающего его грунта ("отдых" слоя);

под действием постепенно возрастающей нагрузки (случай намыва вышележащих слоев);

после окончания намыва вышележащих слоев под действием их массы.

Уплотнение слоя грунтов переменной мощности (мощность постепенно возрастает от нуля до некоторой заданной величины) рассматривалось Р. Гибсоном и М.В. Малышевым [18]. Особенность таких задач состоит в том, что в процессе консолидации растет не только нагрузка, но и увеличивается длина пути фильтрации воды в слое (рис. 8).

Исходное уравнение уплотнения трехфазного грунта имеет вид:

$$\omega_1 \frac{\partial P_n}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_n}{\partial z^2} C_v + f(t), \quad (\text{II.9})$$

где P_n — поровое давление; t — время; $C_v = K_\phi (1 + \epsilon_{cp}) / a \gamma_w$ — коэффициент консолидации; z — координата рассматриваемой точки; $f(t)$ — скорость нагружения, имеющая размерность давления, отнесенного ко времени; ω_1 — коэффициент, учитывающий влияние зашемленного воздуха; K_ϕ — среднее значение коэффициента фильтрации; ϵ_{cp} — среднее значение коэффициента пористости породы для рассматриваемого диапазона уплотняющих нагрузок; a — коэффициент сжимаемости грунта, γ_w — плотность воды.

Коэффициент, учитывающий влияние зашемленного воздуха,

$$\omega_1 = 1 + \frac{\epsilon_{cp} [1 - G_1 (1 - \mu_0)]}{a (P_a + P_n)} = 1 + \frac{a}{P_a + P_n}, \quad (\text{II.10})$$

где G_1 — коэффициент водонасыщения породы; P_a — начальное давление, обычно принимаемое равным атмосферному; μ_0 — коэффициент растворимости воздуха в воде.

Скорость нагружения

$$f(t) = \gamma' \nu_H = \gamma' \frac{\partial h(t)}{\partial t}, \quad (\text{II.11})$$

где ν_H — скорость увеличения толщины слоя; γ' — плотность грунта:

$$\gamma' = \frac{1}{1 + \epsilon_{cp}} \left\{ \Delta - \gamma_B [1 + \epsilon_{cp} (1 - G_1)] \right\}, \quad (\text{II.12})$$

где Δ — плотность частиц грунта.

При полном водонасыщении породы ($G_1 = 1$)

$$\gamma' = \frac{\Delta - \gamma_B}{1 + \epsilon_{cp}}.$$

В практических расчетах плотность намывных грунтов гидроотвала принимается равной γ' лишь при совпадении уровня воды с верхней границей слоя.

М.В. Малышевым [18] получены решения задачи уплотнения слоя переменной мощности как при полном, так и при неполном водонасыщении грунта. На основе этих решений определялось давление в поровой воде для периода намыва при расположении слоя на водоупоре или дренаже. В случае, если $G_1 = 1$, исходное уравнение уплотнения представлялось в виде:

$$\frac{\partial h(t)}{\partial t} F(C_v, t, z) - \frac{\partial h(t)}{\partial t} = -2C_v \frac{\partial F(C_v, t, z)}{\partial z}. \quad (\text{II.13})$$

Вводилась следующая безразмерная функция:

$$N = \frac{2C_v}{h(t) \frac{\partial h(t)}{\partial t}} = \frac{2C_v}{h \nu_H}. \quad (\text{II.14})$$

Затем уравнение (II.14) переписывалось в виде обыкновенного уравнения, которое интегрировалось в замкнутом виде путем разделения переменных

$$Nh(t) \frac{\partial F}{\partial z} + F - 1 = 0. \quad (\text{II.15})$$

В результате разделения переменных, интегрирования уравнения (II.15) и разрешения его относительно F , получается

$$F = C_v \exp \left[-\frac{z}{Nh(t)} \right] + 1. \quad (\text{II.16})$$

Значения коэффициента C_v находятся с учетом граничных условий при расположении слоя:
на водоупоре

$$C_v = -\frac{N}{N+1}, \quad (\text{II.17})$$

на дренаже

$$C_v = -1. \quad (II.18)$$

При $G_1 = 1$ отыскивалось приближенное решение поставленных задач в следующем виде:

$$P_{\text{и}} = F(C_v, t, z) \gamma' [h(t) - z]. \quad (II.19)$$

На искомую безразмерную функцию налагались два условия:

$$\begin{aligned} C_v = 0, \quad F(0, t, z) &= 1, \\ C_v = \infty, \quad F(\infty, t, z) &= 0. \end{aligned} \quad (II.20)$$

Итак, если слой находится на водоупоре, то

$$F = \frac{2C_v [1 - \exp(-zv_H/(2C_v))] + hv_H}{2C_v + hv_H}, \quad (II.21)$$

$$P_{\text{и}}/\gamma' h = (1 - z/h) \frac{2 [1 - \exp(-zv_H^2 t/(2hC_v))] + v_H^2 t/C_v}{2 + v_H^2 t/C_v}. \quad (II.22)$$

Введем обозначения:

$$z/h = k; \quad v_H^2 t/C_v = \mu.$$

Тогда

$$P_{\text{и}}/\gamma' h = \frac{(1 - k) \{ 2 [1 - \exp(-k\mu/2)] + \mu \}}{2 + \mu}. \quad (II.23)$$

Если слой находится на дренаже, то

$$P_{\text{и}}/\gamma' h = (1 - k) [1 - \exp(-k\mu/2)]. \quad (II.24)$$

Приведенное упрощенное решение М.В. Малышева дает хорошую сходимость с решением Гибсона, причем поровое давление, определенное по методу М.В. Малышева, всегда несколько больше (на 5–10 %), чем по точному решению. Так как решение задачи для определения порового давления в слое переменной мощности необходимо использовать при расчете осадок и значений $P_{\text{и}}$ для последующих этапов формирования намывных массивов, целесообразно в качестве исходных использовать сравнительно простые зависимости, полученные М.В. Малышевым. Использование решений Гибсона связано с затруднениями, обусловленными наличием в этих решениях несобственных интегралов*.

Поправки в формулы с учетом нелинейного характера зависимости коэффициентов пористости и фильтрации от уплотняющей нагрузки могут вводиться с помощью соотношений нелинейной фильтрационной консолидации.

Определим осадки слоя переменной мощности, исходя из понятия о средней степени уплотнения U как отношения соответствующей моменту

*Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 2. Л.—М., Госстройиздат, 1961.

времени t площади эпюры эффективных (действующих в скелете грунта) напряжений к площади эпюры напряжений при стабилизированном состоянии:

$$U = \frac{\omega(P_{эф})}{\omega(P_{ст})} = \frac{\omega(P_{ст}) - \omega[P_H(t)]}{\omega(P_{ст})} = 1 - \frac{\int_0^h P_H(z) dz}{\gamma' \int_0^h (h-z) dz}, \quad (II.25)$$

где $\omega(P_{ст})$ — площадь эпюры напряжений в скелете грунта для стабилизированного состояния; $\omega[P_H(t)]$ — площадь эпюры порового давления для момента времени t ; $\omega(P_{эф})$ — площадь эпюры эффективных давлений для момента времени t .

Осадка слоя может быть представлена в виде

$$S(t) = \frac{a}{1 + \epsilon_{ср}} \omega(P_{эф}), \quad (II.26)$$

где

$$\omega(P_{эф}) = \gamma' h^2 / 2 - \omega(P_H) = \gamma' h^2 / 2 - \int_0^h P_H(z) dz. \quad (II.27)$$

При размещении слоя на водоупоре

$$U = \frac{\omega(P_{эф})}{0,5 \gamma' h^2} = \frac{8\mu - 16 [1 - \exp(-\mu/2)]}{\mu^2 (2 + \mu)}. \quad (II.28)$$

При нахождении слоя на дренаже

$$U = \frac{\omega(P_{эф})}{0,5 \gamma' h^2} = \frac{4}{\mu} - \frac{8}{\mu^2} [1 - \exp(-\mu/2)]. \quad (II.29)$$

На рис. 9, а представлены полученные с помощью расчетов на ЭВМ графики для определения порового давления (избыточного сверх гидростатического давления столба воды) в точках с координатами $k = z/h$ и осадки слоя переменной мощности, размещаемого на водоупоре. Избыточное поровое давление определяется с помощью функции

$$F_1(k, \mu) = P_H / (\gamma' h),$$

где γ' — плотность грунтов гидростатического давления.

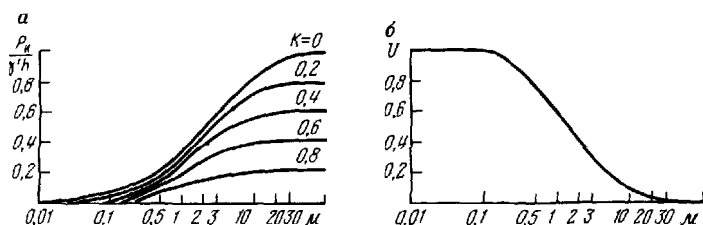


Рис. 9. Зависимости $P_H / \gamma' h$ от μ при различных значениях K (а) и U от μ (б) для слоя на водоупоре

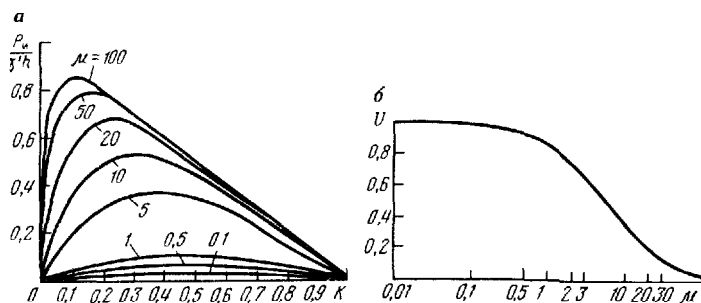


Рис. 10. Зависимости $P_n/\gamma'h$ от K при различных значениях μ (а) и U от μ (б) для слоя на дренаже

Площадь эпюры эффективных давлений, необходимая для вычисления осадки слоя по формуле (II.26), определяется из графика функции $F_2(\mu) = U(\mu) = \omega(P_{эф})/(0,5\gamma'h^2)$ (рис. 9, б).

На рис. 10 показаны графики функций $F_3(k, \mu) = P_n/\gamma'h$ и $F_4(\mu) = U$ к определению избыточного порового давления и степени уплотнения слоя переменной мощности, размещаемого на дренаже.

Рассмотрим уплотнение слоя после окончания намыва под действием собственно и массы слагающего его грунта ("отдых" слоя). После окончания к моменту $t = t_1$ увеличения толщины слоя можно определить изменение во времени избыточного давления в поровой воде (при $dh/dt = v_n = 0$) решением обычного уравнения уплотнения:

$$C_v \partial^2 P_n / (\partial z^2) = \partial P_n / (\partial t). \quad (\text{II.30})$$

Уравнение (II.30) в случае размещения слоя на водоупоре (см. рис. 9, а) решается при следующих краевых условиях:

$$\left. \begin{aligned} t = t_1, \quad P_n = P_n^0(z, t); \\ t > 0 \text{ и } z = 0, \quad \partial P_n / (\partial z) = 0; \\ t > 0 \text{ и } z = v_n t = h, \quad P_n = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.31})$$

Для определения начальных значений P_n используем приведенные выше зависимости.

Если рассматривать слой с двусторонним дренажем (см. рис. 9, б), то краевые условия для решения уравнения Фурье имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} t = 0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad P_n = P_n^0; \\ t > 0, \quad z = 0, \quad P_n = 0; \\ t > 0, \quad z = h, \quad P_n = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.32})$$

Из выражения (II.8) для случая, когда σ_0 не зависит от z' и x' , получим решение одномерной задачи уплотнения слоя под действием постоянной нагрузки:

$$P_n = \frac{4P_n^0}{\pi} \sum_{i=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi z'}{2d}\right) \exp\left(-\frac{i^2 \pi^2 C_v}{4d^2} t_2\right), \quad (\text{II.33})$$

где z' — расстояние от расчетной точки до дренажа; d — максимальная длина пути фильтрации в слое мощностью h ($d = h$ — при одностороннем дренаже и $d = h/2$ — при двустороннем); t_2 — время "отдыха" слоя.

В случае "отдыха" слоя мощностью $h = \nu_n t_1$ на водоупоре с учетом формулы (II.23) получим

$$P_n = \frac{4\gamma'h(1-k) \left\{ 2 \left[1 - \exp\left(-\frac{k\mu}{2}\right) \right] + \mu \right\}}{\pi(2+\mu)} \times \\ \times \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi k_1}{2}\right) \exp\left(-\frac{i^2\pi^2 C_y}{4d} t_2\right), \quad (\text{II.34})$$

где

$$k_1 = (h - z)/h = z'/h.$$

Замена $(h - z)$ на h произведена потому, что в приведенном решении уравнения уплотнения начало системы координат ($z' = 0$) совмещается с поверхностью дренирования.

Введем обозначение

$$\frac{\pi^2 C_y}{4d^2} t_2 = m.$$

С учетом того, что уже второй член ряда (при $i = 3$) практически равен нулю, выражение для определения площади эпюры эффективных давлений представим в виде:

$$\frac{\omega(P_{\text{эф}})}{0,5\gamma'h^2} = 1 - \frac{32 \exp(-m)}{\pi} \left[\frac{\pi(\mu^2 + 4\mu + \pi^2) \exp\left(-\frac{\mu}{2}\right) - 2(\pi^2 - \mu^2)}{(\mu + 2)(\mu^2 + \pi^2)^2} - \right. \\ \left. - \frac{\pi^3 \exp\left(-\frac{\mu}{2}\right) - (2\mu^2 + \mu^3 + 2\pi^2)}{\pi^2(\mu^2 + \pi^2)(\mu + 2)} \right]. \quad (\text{II.35})$$

Расчеты по формуле (II.35) существенно упрощаются при использовании графика функции $F_5(\mu, m) = \omega(P_{\text{эф}})/0,5\gamma'h^2$, представленного на рис. 11, а. Осадка слоя определяется по формуле (II.26).

При "отдыхе" слоя мощностью $h = \nu_n t_1$ на дренаже с учетом формулы (II.24) получим:

$$P_n = \frac{4}{\pi} \gamma'h(1-k) \left[1 - \exp\left(-\frac{k\mu}{2}\right) \right] \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \times \\ \times \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi k_1}{2}\right) \exp(-i^2 m), \quad (\text{II.36})$$

где

$$k_1 = \frac{z'}{0,5h}; \quad 0 \leq z' \leq 0,5h.$$

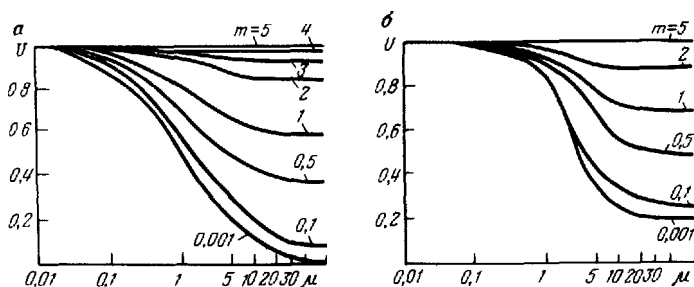


Рис. 11. Зависимости U от μ при различных значениях m при размещении слоя на водоупоре (а) и на дренаже (б)

Выражение для определения $\omega(P_{эф})$ представим в виде

$$\frac{\omega(P_{эф})}{0,5\gamma'h^2} = 1 - \frac{8 \exp(-m) \left\{ \mu^2 (\mu^2 + 8\pi^2) + 4\mu\pi^2 \times \right.}{\pi^2 (\mu^2 +} \times \left. \frac{\times \left\{ 3 + 4 \exp(-\frac{\mu}{2}) \right\}}{+ 4\pi^2)^2} \right\}}{.} \quad (II.37)$$

График к расчету степени уплотнения намывного слоя $U = F_6(\mu, m)$ на дренаже для периода "отдыха" представлен на рис. 11, б. Задача уплотнения слоя под действием постепенно возрастающей нагрузки представляет интерес в случае намыва вышележащих слоев на слой, формирование которого уже закончено.

Положим, что равномерная нагрузка от вышележащих слоев возрастает по закону $q = v_H t$. Интенсивность элементарной нагрузки, прикладываемой в момент времени τ :

$$dq = \partial q / (\partial \tau) d\tau = v_H d\tau.$$

Используем решение для мгновенно приложенной нагрузки [см. формулу (II.33)]. Заменяя в показателе экспоненциальной функции t_2 на $t_3 - \tau$ и интегрируя от 0 до t_3 , получаем величину порового давления для любого заданного момента времени:

$$P_H = \frac{4v_H}{\pi} \sum_{i=1, 3, 5 \dots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi z}{2d}\right) \int_0^{t_3} \exp \times \\ \times \left[-\frac{i^2 \pi^2 C_v}{4d^2} (t_3 - \tau) \right] d\tau = \frac{16v_H d^2}{\pi^3 C_v} \sum_{i=1, 3, 5 \dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} \times \\ \times \sin\left(\frac{i\pi z}{2d}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2 \pi^2 C_v}{4d^2} t_3\right) \right]. \quad (II.38)$$

Осадка слоя на период t_3 роста нагрузки (время намыва вышележащих слоев)

$$S(t) = \frac{a}{1 + \epsilon_{cp}} \omega(P_{эф}) = \nu_n a_0 h \left\{ t_3 - \frac{8}{\pi^2 \mu_1} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} 1/i^4 \times \right. \\ \left. \times [1 - \exp(-i^2 \mu_1 t_3)] \right\} \quad (II.39)$$

Поровое давление

$$\frac{P_u}{q} = \frac{P_u}{\nu_n t_3} = \frac{4}{\pi \mu_1 t_3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} \sin\left(\frac{i \pi z}{2d}\right) \times \\ \times [1 - \exp(-i^2 \mu_1 t_3)], \quad (II.40)$$

где $\mu_1 = \pi^2 C_v / 4d^2$;

z — расстояние рассматриваемой точки в слое от поверхности дренирования; d — максимальная длина пути фильтрации в слое ($d = h$ и $d = h/2$ — соответственно при одностороннем и двустороннем дренаже).

Осадка слоя, уплотняемого постепенно возрастающей нагрузкой,

$$S(t)/S_{\infty} = 1 - 8/(\pi^2 \mu_1 t_3) \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} 1/i^4 \times \\ \times [1 - \exp(-i^2 \mu_1 t_3)], \quad (II.41)$$

где

$$S_{\infty} = ah \nu_n t_3 / (1 + \epsilon_{cp}) = a_0 h q;$$

a_0 — приведенный коэффициент сжимаемости.

Графики для определения порового давления и осадки слоя при постепенном возрастании уплотняющей нагрузки показаны на рис. 12. Поровое давление при намыве вышележащих слоев определяется с помощью графика функции $F_7(k_1, m) = P_u/q$. Степень уплотнения U , равная отношению осадки в данный момент к ее значению на момент стабилизации, определяется по графику функции

$$F_8(m) = S(t)/S_{\infty},$$

где $m = \mu_1 t_3$.

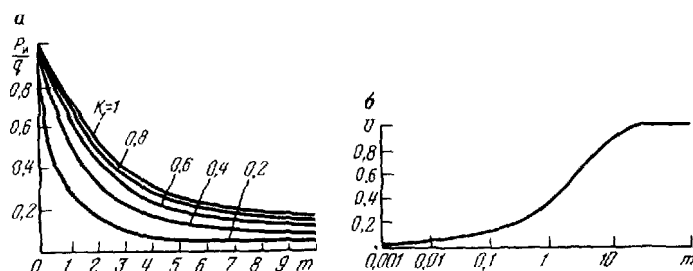


Рис. 12. Зависимости P_u/q от m при различных значениях K_1 (а) и U от m (б) ($q = \nu_n t$)

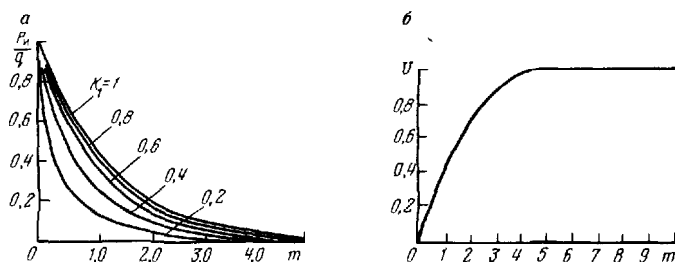


Рис. 13. Зависимости P_u/q от m при различных значениях K_1 (а) и U от m (б) ($q = \text{const}$)

При рассмотрении уплотнения слоя после окончания намыва вышележащих слоев рассеивание порового давления в период действия постоянной нагрузки можно оценивать с помощью графика функции

$$F_9(k_1, m) = P_u/P_u^0$$

(рис. 13, а). Здесь в величину m входит время действия постоянной нагрузки. Этот график [см. формулу (II.33)] пригоден для прогноза динамики порового давления как при уплотнении слоя под действием собственной массы слагающих его пород [P_u^0 определяется по формулам (II.23), (II.24)], так и при "отдыхе" слоя после прекращения намыва гидростатала и уплотнения под действием вышележащих намывных масс [P_u^0 определяется по формуле (II.40)]. На рис. 13, б дан график к определению степени уплотнения слоя U при действии постоянной нагрузки. Степень уплотнения дана в виде функции

$$F_{10}(m) = S(t)/S_\infty = S(t)/(a_0 h q).$$

При фронтальной отсылке сухих отвалов на намывных основаниях величину избыточного порового давления в водонасыщенных глинистых породах оснований следует определять с учетом темпа роста уплотняющей нагрузки, так как использование в этом случае решений теории уплотнения для мгновенно приложенной нагрузки дает завышенные значения порового давления и приводит к занижению расчетных показателей сопротивления пород сдвигу и допустимых параметров откосов. Для определения порового давления и степени уплотнения сильносжимаемых водонасыщенных слоев основания мощностью m_1 в период отсыпки насыпи используют зависимости (II.40), (II.41) и графики (см. рис. 12). Скорость нагружения (роста породного столба) основания и любого горизонтального сечения в теле отвальной насыпи определяется из выражения

$$v_n = v_\phi \gamma \tan \alpha,$$

где v_ϕ — скорость подвигания отвального фронта $v_\phi = dx/dt$; α — угол откоса отвала; γ — плотность отвальных пород.

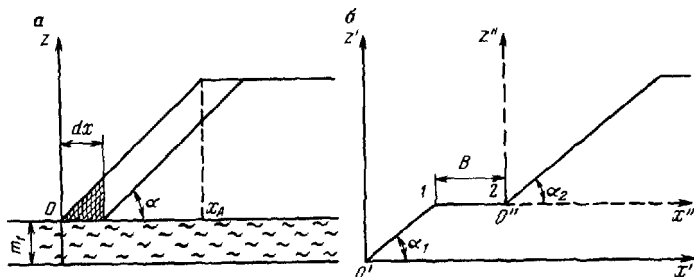


Рис. 14. Схемы к расчету уплотнения намывных оснований одноярусного (а) и многоярусного (б) отвала

Для определения порового давления в любой точке (x, z) основания слой глинистого грунта разделяется на два участка по оси x (рис. 14, а), для которых

$$\begin{aligned} z &= x \operatorname{tg} \alpha, & 0 \leq x \leq x_A; \\ z &= H, & x \geq x_A. \end{aligned}$$

При $0 \leq x \leq x_A$ и $t_1 = x/v_\phi$ поровое давление определяется по формуле (II.40) или графику (рис. 12). Нагрузка от отвальных пород представляется в виде $q = v_H t_1$.

При $x = x_A$ и $t_1 = H/v_\phi \operatorname{tg} \alpha$ поровое давление достигает максимума. В момент t_2 поровое давление после окончания отсыпки определяется по выражению (II.33) или с использованием графика функции $F_9(k_1, m) = P_H/P_H^0$ на рис. 13.

Если основание нагружается системой отвальных уступов с углами откосов α_1 и α_2 (рис. 14, б), то для определения P_H на участке основания, нагруженного предотвалом с шириной площадки B , где $0 \leq x' \leq x'_2$, используются выражения (II.38) и (II.33). На участке, где $x' > x'_2$, поровое давление подсчитывается по тем же формулам и затем складывается с поровым давлением, определенным для случая нагружения основания предотвалом по формуле (II.33), в которой принимается $t_2 = (B + x'')/v_\phi$.

При блоковой отсыпке уплотняющая нагрузка в пределах заходки обычно возрастает быстро, что позволяет условно рассматривать ее как приложенную мгновенно. Рассеивание порового давления целесообразно учитывать с помощью формулы (II.33), полагая время приложения уплотняющей нагрузки равным нулю.

Для форсирования консолидации намывных массивов могут применяться вертикальные дренажи, дренажные прорезы и песчаные подушки. Анализ разработанных К.Терцаги, Л.Рендуликом, Р.Барроном, В.Кейльманом методов расчета уплотнения сложенных сильносжимаемыми грунтами оснований при работе перечисленных дренажных устройств выполнен М.Ю. Абелевым, которым предложены методы расчета консолидации грунтов оснований с учетом структурной прочности сжатия и начального градиента напора [15]. Согласно расчетной схеме для случая

свободных деформаций вблизи вертикальных дрен и дренирующих прорезей осадки будут происходить быстрее, чем в удалении от дрен. Для случая равных деформаций осадка горизонтальной дренирующей подушки принимается равномерной.

В соответствии с новой технологией формирования гидроотвалов в намывных массивах тонкодисперсных грунтов создаются дренажные призмы, которые являются аналогами дренажных прорезей в естественных слабых основаниях. В связи с тем, что дренажные призмы располагаются на значительном расстоянии одна от другой, расчеты уплотнения намывных оснований следует проводить по схеме свободных деформаций [15]. Условия формирования гидроотвалов определяют анизотропность намывных оснований, для которых коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении в 5–20 раз больше, чем в вертикальном. Вода, отжимаемая из пор водонасыщенных грунтов, движется к песчаной подушке и в дренажную призму (прорезь), т. е. в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Общее уравнение консолидации для этой двухмерной задачи:

$$\frac{K_r}{\gamma_b} \frac{\partial^2 P_{\Pi}}{\partial x^2} + \frac{K_z}{\gamma_b} \frac{\partial^2 P_{\Pi}}{\partial z^2} = \frac{a_z}{1 + \epsilon_{\text{ср}}} \frac{\partial P_{\Pi}}{\partial t}, \quad (\text{II.42})$$

где K_r , K_z — коэффициенты фильтрации соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; a_z — коэффициент сжимаемости грунта в вертикальном направлении; $\epsilon_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента пористости в процессе уплотнения.

Решение этой двухмерной задачи находится по формуле Н. Карилло с использованием решений двух одномерных задач [15].

$$P_{\Pi rz} = P_{\Pi r} P_{\Pi z} / P_{\Pi 0}, \quad (\text{II.43})$$

где $P_{\Pi rz}$ — поровое давление при одновременном движении воды в песчаную подушку и дренажную прорезь; $P_{\Pi r}$ — поровое давление при движении воды только в дренажную прорезь; $P_{\Pi z}$ — поровое давление при движении воды только в песчаную подушку.

Общая степень уплотнения U_{Σ} получается по теореме Н. Карилло из выражения

$$1 - U_{\Sigma} = (1 - U_r)(1 - U_z), \quad (\text{II.44})$$

где U_r , U_z — степени уплотнения при движении воды соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Осадка слоя на момент t определяется в виде

$$S(t) = S_{\infty} U_{\Sigma}.$$

Решения одномерных задач при постепенном и условно-мгновенном приложении нагрузки q даны в виде графиков $P_{\Pi} = f(z/h, m)$ и $U = \varphi(m)$ на рис. 12, 13.

С учетом структурной прочности $P_{\text{стр}}$ и начального градиента напора

i_0 начальное поровое давление $P_{и0}$ и радиус влияния дренажной прорези R_Φ определяются в виде:

$$P_{и0} = q - P_{стр}, \quad (II.45)$$

$$R_\Phi = q - P_{стр} / \gamma_{в} i_0. \quad (II.46)$$

Решения задач фильтрационной консолидации позволяют удовлетворительно описывать развитие осадок тонкодисперсных намывных грунтов в пределах 80–90 % максимальной (стабилизированной) осадки. Для повышения точности описания процесса уплотнения может быть использовано решение одномерной задачи консолидации и ползучести двухфазных грунтов с учетом взаимодействия фаз, полученное Ю.К. Зарецким.

Ползучесть минерального скелета целесообразно учитывать для периода после завершения формирования рассматриваемого намывного слоя.

Поровое давление с учетом ползучести скелета для слоя грунта, уплотняемого под действием нагрузки q , дается выражением [18]:

$$P_{и} = \frac{4\beta q}{\pi} \sum_{i=1, 3, 5 \dots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi z'}{2d}\right) [\psi_i(t) + \int_0^t K(t-\tau) \psi_i(\tau) d\tau], \quad (II.47)$$

где β — коэффициент порового давления; z' — координата точки в слое (начало координат — на верхней границе слоя); d — длина пути фильтрации;

$$\psi_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{i\pi}{2d}\right)^2 C_v t\right],$$

$K(t-\tau) = \delta \exp[-\delta_1(t-\tau)]$ — ядро ползучести экспоненциального вида.

Поровое давление в намывном слое

$$P_{и} = \frac{4P_{и}^0}{\pi} \sum_{i=1, 3, 5 \dots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin\left(\frac{i\pi z'}{2d}\right) \bar{\psi}_i(t), \quad (II.48)$$

где $P_{и}^0$ — начальное поровое давление, определяемое по формулам (II.23) и (II.24); z' — координата рассматриваемой точки в слое (начало координат на верхней границе слоя);

$$\bar{\psi}_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{i\pi}{2d}\right)^2 C_v t\right] + \frac{\delta}{\delta_1} \frac{\exp\left[-\left(\frac{i\pi}{2d}\right)^2 C_v t\right] - \exp(-\delta_1 t)}{1 - \left(\frac{i\pi}{2d}\right)^2 \frac{C_v}{\delta_1}}.$$

Функция $\bar{\psi}_i(t)$ представлена с учетом ядра ползучести экспоненциального вида и принимает предельные значения: при $t = 0$ $\bar{\psi}(t) = 1$; при $t \rightarrow \infty$ $\bar{\psi}_i(t) \rightarrow 0$.

Осадка намывного слоя

$$S(t) = \omega(P_{ст}) [a_{оперв} U_{перв} + a_{овт} U_{вт}], \quad (II.49)$$

где $a_{оперв}$ — приведенный первичный коэффициент сжимаемости (для

диапазона осадок до достижения $P_n = 0$); $a_{\text{вт}}$ — приведенный вторичный коэффициент сжимаемости (для периода развития лишь деформаций ползучести); $U_{\text{перв}}$ — степень фильтрационной консолидации, определяемая по формулам (II.35), (II.37).

Степень вторичной консолидации, обусловленной ползучестью минерального скелета, определяется из выражения

$$U_{\text{вт}} = 1 - \exp(-\delta_1 t) - 8/\pi^2 \sum_{i=1, 3, 5 \dots}^{\infty} 1/i^2 \times \\ \times \frac{\exp[-(\frac{i\pi}{2d})^2 C_v t] - \exp(-\delta_1 t)}{1 - (i\pi/2d)^2 C_v/\delta_1}. \quad (\text{II.50})$$

Осадка слоя может также определяться через общую степень уплотнения U_{Σ} :

$$S(t) = a_0 \omega(P_{\text{ст}}) U_{\Sigma}, \quad (\text{II.51})$$

где $a_0 = a_{\text{перв}} + a_{\text{вт}} [1 - \exp(-\delta_1 t)]$,

$$U_{\Sigma} = \frac{U_{\text{перв}} + (\delta/\delta_1) U_{\text{вт}}}{1 + \delta/\delta_1}.$$

При постепенном приложении внешней нагрузки на намывные слои поровое давление с учетом ползучести получается интегрированием выражения для мгновенно приложенной нагрузки [17].

Для прогноза уплотнения глинистых водонасыщенных грунтов дамб расслохранилищ или гидроотвалов с использованием уравнения плоской задачи фильтрационной консолидации (II.6) в МГИ В.С. Зайцевым использовалась универсальная сеточная модель УСМ-1, которая предназначена для численного приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического и параболического типов. Моделирование проводилось для дамбы трапециевидной формы с геометрическими параметрами: высота 10–20 м, угол откоса 20–40°, ширина по верху — 5 м. Коэффициент консолидации изменялся от 0,1 до 0,01 м²/сут, число дренирующих поверхностей — от двух до трех. Выявлены характер распределения и величины порового давления в теле дамбы на различные сроки стояния (1–25 лет). Постепенность возведения дамбы при моделировании не учитывалась. Сопоставление результатов моделирования и расчетов порового давления по формуле Н. Карилло (II.43) свидетельствует о принципиальной возможности инженерного расчета уплотнения глинистых водонасыщенных грунтов дамб с использованием решений одномерных задач, учитывающих фильтрацию поровой жидкости по двум направлениям.

Решение сформулированных Ю.К. Зарецким и В.Н. Ломбардо уравнений, наиболее полно описывающих изменения напряженно-деформированного состояния плотин из грунтовых материалов на стадиях их строительства и эксплуатации, выполнялось с использованием метода конечных разностей [19]. Уравнения состояния грунтов основаны на теории плас-

тического упрочнения. При расчете консолидации Нурекской плотины поровое давление и перемещения определяли путем совместного решения системы уравнений, описывающих поведение однофазного материала в области верховой и низовой упорных призм, и уравнений трехфазного ($G_1 = 0,9$) глинистого грунта, уложенного в ядро плотины. Установлено, что после завершения строительства плотины высотой 260 м и заполнения водохранилища установившийся режим фильтрации через плотину формируется после 20-летнего периода ее эксплуатации. Осадка гребня плотины за этот период оценивается в 3 м.

При прогнозе поведения глинистого ядра плотины учитывали его взаимодействие с упорными призмами из крупнообломочного и гравийно-галечникового материала, зависимость коэффициента фильтрации от уплотнения, фильтрационную анизотропию (отношение коэффициентов фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях принято равным 10), а также динамику возведения сооружения.

Однако применение разработанных в НИС Гидропроекта теоретических решений для проектирования дамб гидроотвалов и хвостохранилищ весьма затруднительно в связи с тем, что целевое назначение, конструкция, условия формирования дамб этих сооружений и плотин водохранилищ ГЭС существенно различаются.

Поэтому представляется целесообразным для определения параметров устойчивых откосов дамб гидроотвалов и хвостохранилищ использовать инженерные методы расчета уплотнения грунтов и устойчивости откосов при условии совершенствования методов получения надежной информации о свойствах намывных массивов и их оснований.

11.3. СДВИГОВАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

Для оценки во времени сопротивления сдвигу и характера развития сдвиговых деформаций в теле дамб, намывных и естественных основаниях, сложенных глинистыми грунтами, процесс уплотнения которых можно считать законченным, целесообразно использовать представления структурной механики грунтов.

Сдвиговая ползучесть глинистых грунтов характеризуется тремя разновидностями реологических кривых (рис. 15). Из рис. 15, а следует, что процесс ползучести может быть как затухающим (при действующем касательном напряжении τ , меньшем предельно длительного сопротивления сдвигу τ_∞), так и незатухающим (при $\tau > \tau_\infty$). Этим разновидностям процесса ползучести соответствуют одно- и трехстадийные зависимости скорости деформации сдвига при единичном напряжении ($\dot{\epsilon}/\tau$). При незатухающей ползучести скорость деформации в момент t_T достигает минимального значения, которое остается примерно постоянным в период установившегося течения ($t_T - t_p$). Вторая стадия переходит в прогрессирующее течение с возрастающей скоростью и заканчивается при $t = t_p$ разрушением грунта (рис. 15, б). Зависимость между напряжением и временем разрушения характеризуется кривой длительной прочности на

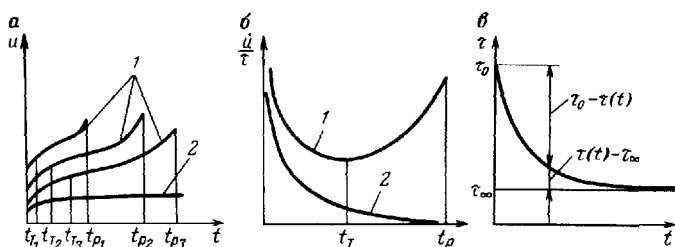


Рис. 15. Зависимости от времени t деформаций $u(a)$, скорости деформации при единичном напряжении (u/τ) (б) и сдвигающих касательных напряжений τ (в):
1 — при $\tau > \tau_\infty$; 2 — при $\tau < \tau_\infty$

рис. 15, в, начальная ордината которой соответствует условно-мгновенному сопротивлению сдвигу τ_0 ($t = 0$).

Экспериментальными исследованиями установлено, что в процессе деформирования структура глинистых пород существенно изменяется [16].

Деформацию глинистой породы в свете современных представлений целесообразно рассматривать как следствие изменения структуры, т. е. одновременного развития дефектов и переориентации минеральных частиц. Таким образом, индикатором напряженно-деформированного состояния можно считать структуру породы и ее перестройку. С учетом необходимости определения критических разрушающих сдвиговых деформаций оснований и откосных сооружений используем закономерности деформирования, описывающие все три стадии процесса ползучести.

Физические основы структурно-механического подхода сформулированы С.С. Вяловым, Р.В. Максимаком и Н.К. Пекарской и сводятся к следующим положениям [16].

1. Пластическое деформирование грунта вызывается смещением частиц и их переориентацией. Длительное разрушение связано с развитием дефектов и микротрещинообразованием.

2. Разрушение наступает, когда плотность дефектов достигает определенной величины; плотность ориентированных частиц пропорциональна длительности процесса при $\tau > \tau_\infty$.

При математической формулировке перечисленных положений процесс образования дефектов рассматривался как стохастический по схеме мгновенных повреждений, причем изменение необходимой для смещения частиц энергии (активизации) предполагается пропорциональным вероятности повреждения. Согласно кинетической теории прочности и ползучести, деформирование и разрушение горных пород связываются с преодолением минеральными частицами и их агрегатами энергетического барьера и переходом в новое положение равновесия под воздействием активирующей эти частицы силы.

После приложения напряжения и нарушения связей между частицами происходит смещение этих частиц вместе с пленкой связанной воды. При

напряжении, меньшем предельно длительного сопротивления грунта сдвигу ($\tau < \tau_\infty$), переупаковка частиц приводит к "залечиванию" дефектов, уменьшению их количества и соответственно упрочению грунта и затуханию деформаций. При $\tau > \tau_\infty$ развитие микротрещин в сочетании с переориентацией частиц определяет снижение прочности грунта и возникновение незатухающих деформаций. В качестве характеристик структуры глинистых грунтов используются плотность дефектов ω и степень ориентации частиц в направлении сдвига Ω , определяемые при микроскопических исследованиях. Относительное содержание объема микротрещин в единице объема грунта (ω) изменяется в следующих пределах (ω_n , ω_p — соответственно начальная плотность дефектов и при разрушении):
 при затухающем процессе $0 < \omega < \omega_n < 1$,
 при незатухающем процессе $\omega_n < \omega < \omega_p < 1$.

Относительное содержание в единице объема грунта ориентированных в направлении сдвига частиц (Ω) зависит от длительности процесса: при $t \rightarrow \infty \Omega \rightarrow 1$.

Предложенные Ю.К. Зарецким реологические уравнения состояния квазиоднофазных грунтов позволили ему получить определяющие процесс ползучести соотношения.

Аналитическое выражение уравнения состояния в условиях чистого сдвига, по Ю.К. Зарецкому, принимается в следующем виде при $\tau = \text{const}$:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta_0} \left[\frac{\exp\left(\frac{\tau}{T_T} \frac{\tau - \tau_\infty}{\tau_0 - \tau} t\right)}{t \delta} \right] \tau, \quad (II.52)$$

где $\eta_0 = \text{const} \exp(U_0^*/k\theta)$ — начальная вязкость, зависящая от начальной структуры, плотности, влажности и температуры θ ; U_0^* — начальная энергия активации; k — постоянная Больцмана; δ — безразмерный параметр; T_T — параметр, имеющий размерность времени; $\tau - \tau_\infty/\tau_0 - \tau = \bar{\tau}$ — уровень напряжений; τ , τ_∞ , τ_0 — соответственно текущее, длительное и условно-мгновенное значение сопротивления породы сдвигу.

Величина коэффициента вязкости η рассматривается в зависимости от уровня напряжений, времени и температуры:

$$\eta = \eta_0 \left[\left(\frac{t}{T_T} \right)^\delta \exp(-\delta \bar{\tau} \frac{t}{T_T}) \right]. \quad (II.53)$$

Максимум η достигается при минимальной скорости ползучести в момент $t = t_T$. Время разрушения t_p определяется по формуле

$$t_p = m T_T / \bar{\tau}, \quad (II.54)$$

где $m = 1 + \frac{1}{\sqrt{\delta}}$.

Условие длительной прочности, не зависящее от характера нагруже-

ния, представляется в виде:

$$\int_0^{t_p} \frac{\tau(\xi) - \tau_\infty}{\tau_0 - \tau(\xi)} d\xi = m \dot{T}_T = T_p. \quad (\text{II.55})$$

Из этого условия прочности вытекает соотношение

$$t_p/t_T = \text{const} = m.$$

Аналитическое описание кинетики развития дефектов дается в виде:

$$\begin{aligned} \omega &= 1 - (1 - \omega_H) \exp(-\delta \bar{\tau} \frac{t}{T_p}) \quad \text{при } \tau > \tau_\infty, \\ \omega &= \omega_H \exp(-\frac{\delta \bar{\tau} t}{T_T}) \quad \text{при } \tau \leq \tau_\infty. \end{aligned} \quad (\text{II.56})$$

Параметр δ определяется через значения начальной (ω_H) и для момента начала течения (ω_T) плотности дефектов:

$$\delta = \ln \frac{1 - \omega_H}{1 - \omega_T}. \quad (\text{II.57})$$

При $\tau = \text{const}$ деформация как функция времени получается путем интегрирования выражения (II.52):

$$\begin{aligned} u(t) = u_0 + \left\{ \tau \frac{t^{1-\delta}}{\eta_0} \left[\frac{1}{1-\delta} + \frac{\delta \bar{\tau}}{2-\delta} \left(\frac{t}{T_T} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2(3-\delta)} (\delta \bar{\tau})^2 \left(\frac{t}{T_T} \right)^2 + \dots \right] \right\}, \end{aligned} \quad (\text{II.58})$$

где u_0 — условно-мгновенная деформация (начальная).

При $\delta = 1$ (в частном случае, используемом для упрощения задачи)

$$u(t) = u_0 + \frac{\tau}{\eta} \left[\ln t + \bar{\tau} \frac{t}{T_T} + \frac{1}{4} \bar{\tau}^2 \left(\frac{t}{T_T} \right)^2 + \dots \right]. \quad (\text{II.59})$$

При ограничении выражений (II.58) и (II.59) первыми слагаемыми в скобках соответственно получаются известные степенной и логарифмический законы деформирования. При оставлении двух членов в скобках формулы (II.59) получается зависимость, подобная предложенным Н.Н. Масловым и С.С. Вяловым:

$$u = u_0 + \frac{\tau}{\eta} \left(\ln t + \frac{\tau - \tau_\infty}{\tau_0 - \tau} \frac{t}{T_T} \right). \quad (\text{II.60})$$

Широко используемый для мерзлых грунтов степенной закон, пригодный также для упрощенного описания зависимостей между напряжением τ и деформацией u для любого момента времени t (в диапазоне $0 \leq t \leq$

$\leq t_p$) талых глинистых и некоторых твердых пород, выражается уравнением

$$\tau = A(t) u^m; \quad (II.61)$$

$$u = \tau^{\frac{1}{m}} \left[\frac{1}{A_n} + \frac{1}{\xi} t^\alpha \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (II.62)$$

где A_n — коэффициент начальной деформации; $m < 1$ — коэффициент упрочения; ξ, α — параметры, определяемые из опыта; $A(t) = (1/A_n + 1/\xi t^\alpha)$ — коэффициент деформации.

Универсальность выражения (II.52) подтверждается тем, что оно обобщается на случай сложного напряженного состояния, а также при соответствующем подборе параметров переходит в известные эмпирические уравнения. Поэтому уравнение (II.52) может рассматриваться в качестве закономерности деформирования как для глинистых, так и для твердых пород.

Для уточнения возможностей применения формулы (II.58) выполним интегрирование выражения (II.52). Пусть

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta \bar{\tau}}{T_T} = x; \quad \frac{\tau}{\eta_0} = \alpha, \\ \text{тогда} \quad \left. \begin{aligned} du/dt &= [\alpha \exp(xt)] t^{-\delta}, \\ \int_0^t du &= \alpha \int_0^t [\exp(xt)] t^{-\delta} dt; \\ u(t) &= u_0 + \alpha \int_0^t [\exp(xt)] t^{-\delta} dt. \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (II.63)$$

Известно, что при всех $|t| < \infty$

$$\exp(xt) = 1 + xt + \frac{x^2 t^2}{2!} + \frac{x^3 t^3}{3!} + \frac{x^4 t^4}{4!} + \dots$$

Тогда

$$\begin{aligned} u(t) &= u_0 + \alpha \int_0^t t^{-\delta} \left[1 + xt + \frac{x^2 t^2}{2!} + \frac{x^3 t^3}{3!} + \frac{x^4 t^4}{4!} + \dots \right] dt = \\ &= u_0 + \alpha \left[\frac{t^{1-\delta}}{1-\delta} + x \frac{t^{2-\delta}}{2-\delta} + \frac{x^2}{2!} \frac{t^{3-\delta}}{3-\delta} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{x^3}{3!} \frac{t^{4-\delta}}{4-\delta} + \dots + \frac{x^n}{n!} \frac{t^{n+1-\delta}}{(n+1-\delta)} \right]. \end{aligned} \quad (II.64)$$

При $\delta = 1$ получаем выражение (II.59), которое непригодно для инженерных расчетов, так как

$$\int_0^t \frac{\exp(xt)}{t} dt$$

расходится при $t = 0$ и при u_0 не существует. При $0 < \delta < 1$ интеграл сходится при $t = 0$.

С учетом вышеизложенного использование для расчетов выражения (II.58) нецелесообразно. Теоретические значения $u(t)$ следует определять путем расчетов на ЭВМ по предложенной формуле (II.63).

С учетом условия достижения критической плотности микротрещин $\omega_p = \text{const}$ в момент t_p разрушения горной породы и предложенного Ю.К. Зарецким и С.С. Вяловым выражения для описания процесса трещинообразования уравнение длительной прочности принимает вид:

$$\tau = \tau_0 - (\tau_0 - \tau_\infty) \frac{t_p}{T_p + t_p}, \quad (\text{II.65})$$

где t_p — момент разрушения породы, когда плотность трещин достигает критического значения; T_p — параметр, имеющий размерность времени.

Для определения параметров ползучести горных пород (η_p, η_T, δ) или скоростей деформации $\dot{u}_{T,p}$ с учетом соотношения (II.55) следует использовать равенства, вытекающие из уравнений (II.52) и (II.65):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{u}_T}{\tau} &= \frac{a_1}{t \delta_T} = \frac{\bar{\tau} \delta}{\eta_T}; \\ \frac{\dot{u}_p}{\tau} &= \frac{a_2}{t \delta_p} = \frac{\bar{\tau} \delta}{\eta_p}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.66})$$

Структурно-механические уравнения ползучести и длительной прочности могут быть применены к отвальным массивам и их основаниям, сложенным глинистыми, мерзлыми или заснеженными грунтами.

ГЛАВА III

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

III.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Расчеты устойчивости преимущественно включают определение сдвигающих и удерживающих сил (напряжений) и установление на основе сравнения этих сил коэффициентов запаса устойчивости откосов заданного профиля. Вопросы расчета устойчивости насыпных и намывных плотин и ограждающих дамб хвостохранилищ при круглоцилиндрических, плоских или комбинированных поверхностях скольжения рассмотрены в рабо-

тах [2, 3, 4, 5, 7, 19, 20]. При определении коэффициентов запаса устойчивости учитывается поровое давление в глинистых грунтах основания и тела земляных плотин, а также сейсмические нагрузки, рассматриваемые в качестве дополнительных сдвигающих нагрузок к статическим. Ю.К. Зарецким и В.Н. Ломбардо [19] предложена методика оценки устойчивости земляных сооружений по критерию начала прогрессирующего накопления пластических деформаций, определяемого по графикам развития во времени перемещений характерных точек (например, бровки откоса). На примере плотины Нурекской ГЭС показано, что в результате воздействия статических нагрузок области предельного состояния не формируются. В условиях динамического воздействия сейсмоустойчивость Нурекской плотины рассматривается с учетом плотности укладки крупнообломочного материала в упорные призмы и величины динамического порового давления.

При оценке устойчивости откосных сооружений гидроотвалов тонкодисперсных грунтов вероятная поверхность скольжения с ростом высоты гидроотвала при небольших углах откоса дамбы захватывает толщу неконсолидированных грунтов пляжной (приоткосной) зоны. В этих случаях необходимо учитывать как силы гидростатического взвешивания и гидродинамического давления, так и наличие избыточного порового давления. При высоких темпах возведения гидроотвалов избыточное поровое давление также возникает в глинистых грунтах оснований.

По принципу применения исходных прочностных характеристик методы расчета устойчивости дамб гидроотвалов при незавершенной консолидации тонкодисперсных грунтов разделяются на две группы:

использующие показатели сопротивления сдвигу консолидированных грунтов при дополнительном учете порового давления (В.А. Флорин, А.А. Ничипорович, А. Бишоп и др.);

непосредственно использующие результаты испытаний грунтов при незавершенной их консолидации (А. Скемpton, Г.Л. Фисенко).

В методах первой группы учет нестабилизированного состояния при определении устойчивости водонасыщенных породных масс по существу не отличается от учета фильтрационных сил в случае установившегося режима фильтрации. Вместо сетки движения, соответствующей установившемуся фильтрационному потоку для момента времени, применительно к которому производится расчет устойчивости, методами теории уплотнения строятся линии равных давлений. Затем, так же как и при учете фильтрационных сил, для каждой расчетной поверхности скольжения строится эпюра давлений воды.

Возможности применения перечисленных методов для расчетов устойчивости отвалов на карьерах рассмотрены в работе [21].

Для расчетов устойчивости упорных призм гидроотвалов применяют методы алгебраического суммирования сил по круглоцилиндрическим и монотонным криволинейным поверхностям и метод многоугольника сил при любой форме поверхности скольжения [7].

Сложенные раздельнозернистыми материалами упорные призмы рассматриваются как фильтрующие откосы. На рис. 16, а дана схема к расче-

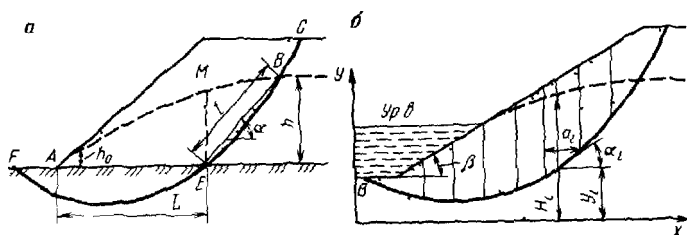


Рис. 16. Схемы к расчету устойчивости обводненного откоса упорной призмы: а – фильтрующего, б – подтопленного

ту обводненного откоса с депрессионной поверхностью AB и поверхностью скольжения $CBEF$, расположенного на водоупоре. При формировании депрессионной поверхности (кривой) в теле откосного сооружения возникает гидродинамическое (боковое) давление, обусловленное разностью напоров в пределах боковых граней каждого элементарного объема обводненного массива. Оценка суммарного влияния гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на нормальные и тангенциальные силы по поверхности скольжения в пределах обводненной призмы возможного оползания дана Г. Л. Фисенко и В. А. Мироненко [22].

Объем блока, занятого потоком,

$$S = \frac{1}{2} (h + h_0) L,$$

а градиент напора

$$I = \frac{h - h_0}{L}.$$

Сила гидродинамического давления

$$F_I = IS = 1/2 (h^2 - h_0^2) \quad (\text{III } 1)$$

Принимая $h_0 = 0$, получаем $F_I = 1/2 h^2$

Разложим силу F_I на нормальную и тангенциальную составляющие относительно участка кривой скольжения BE .

$$\Delta N_I = \frac{1}{2} h^2 \sin \alpha, \quad (\text{III } 2a)$$

$$\Delta T_I = \frac{1}{2} h^2 \cos \alpha \quad (\text{III.26})$$

Сила гидростатического взвешивания для блока EMB равна его площади

$$F_{взв} = S_{EMB} = \frac{1}{2} h l \cos \alpha \quad (\text{III.3})$$

Нормальная и тангенциальная составляющие этой силы:

$$\Delta N_s = \frac{1}{2} h l \cos^2 \alpha, \quad (\text{III.4a})$$

$$\Delta T_s = \frac{1}{2} h l \cos \alpha \sin \alpha. \quad (\text{III.4б})$$

Суммарные значения нормальных и тангенциальных составляющих

$$F_j \text{ и } F_{\text{взв}}: \Delta N = -\Delta N_j - \Delta N_s = -\frac{1}{2} h l, \quad (\text{III.5a})$$

$$\Delta T = \Delta T_j - \Delta T_s = 0 \text{ с учетом } h = l \sin \alpha. \quad (\text{III.5б})$$

Знак "—" перед ΔN показывает, что ΔN имеет направление, противоположное силе тяжести.

Таким образом, совместное действие гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на призму возможного оползания в фильтрующих слоях определяется как гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения, нормальное к ней и изменяющее (уменьшающее) только нормальную составляющую массы блоков; на касательные составляющие давление воды существенного влияния не оказывает.

Уравнение равновесия с учетом давления D_i , равного в каждой точке поверхности скольжения разности отметок этой точки и высоты пьезометрического уровня над ней, приобретает вид.

$$\eta = \frac{\sum \text{tg } \varphi_i (N_i - l_i D_i) + \sum C_i l_i}{\sum T_i}, \quad (\text{III.6})$$

где φ_i , C_i — соответственно угол внутреннего трения и сцепление по основанию блоков; N_i , T_i — соответственно нормальные и касательные составляющие массы элементарных блоков породы без учета гидростатического взвешивания; l_i — длина наклонного основания блоков; D_i — величина гидростатического давления в середине оснований блоков.

Если к низовому откосу упорной призмы примыкает вторичный пруд-аккумулятор, то производится расчет подтопленного откоса (рис. 16, б). Согласно приближенному методу ВНИИМ, расчет ведется в такой последовательности на расчетный разрез наносят депрессионную кривую и линию равных напоров, построенные на приборе ЭГДА; определяют положение наиболее опасной поверхности скольжения (без учета гидростатических и гидродинамических сил); выделенный указанным образом "оползневой клин" разбивают вертикальными линиями на отдельные блоки; результирующую гидростатических и гидродинамических сил в пределах i -го блока определяют по формуле

$$F_i = \gamma_{\text{в}} (H_i - y_i) a_i / \cos \alpha_i, \quad (\text{III.7})$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды; H_i и y_i — соответственно напор и ордината кри-

вой скольжения, средние в пределах блока; a_i — ширина блока, α_i — средний угол наклона касательной к кривой скольжения в пределах блока.

Коэффициент запаса устойчивости

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ [P_i \cos \alpha_i + P_i^B \frac{\cos(\beta - \alpha_i)}{\cos \beta} - F_i] \operatorname{tg} \varphi_i + C_i l_i \right\}}{\sum_{i=1}^n [P_i \sin \alpha_i - P_i^B \frac{\sin(\beta - \alpha_i)}{\cos \beta}]}, \quad (\text{III.8})$$

где P_i — масса i -го блока вместе с заключенной в нем водой; P_i^B — масса воды над поверхностью откоса; β — угол откоса.

Суммарное воздействие гидростатических и гидродинамических сил на общую устойчивость откоса может быть оценено с помощью метода Р.Р. Чугаева. Согласно этому методу, гидростатическое и гидродинамическое давление приводятся к одной результирующей объемной силе F . Для нахождения величины и направления вектора предварительно строится поле соответствующей потенциальной функции.

Если подтопленный откос сложен уплотненными глинистыми грунтами, то для оценки его устойчивости целесообразно применять метод многоугольника сил. При прохождении поверхности скольжения в глинистых водонасыщенных грунтах приоткосной зоны или естественного основания следует учитывать нестабилизированное состояние этих грунтов.

Для намывных глинистых грунтов гидроотвалов график сопротивления сдвигу описывается нелинейной зависимостью $\tau = f(\sigma_n)$. С целью повышения точности расчетов устойчивости откосов применяется предложенный Г.Л. Фисенко метод касательных напряжений, согласно которому сопоставляются действующие по поверхности скольжения сдвигающие касательные напряжения и соответствующие значения общего сопротивления сдвигу, без разделения его на силы трения и сцепления. Для этого производится развертка расчетной поверхности скольжения, на которой в соответствующих точках восстанавливаются ординаты, равные действующим касательным напряжениям и сопротивлениям сдвигу.

Сдвигающие касательные напряжения: $\tau_{cd} = 1/2 h_i \gamma \sin 2\alpha_i$, где h_i — высота породного отсека в расчетной точке поверхности скольжения; γ — плотность грунтов, α_i — угол наклона поверхности скольжения.

Сопротивление грунта сдвигу (удерживающее касательное напряжение $\tau_{уд}$) определяют по графику сопротивления сдвигу по величине нормального напряжения $\sigma_n = h_i \gamma \cos^2 \alpha_i$. Концы ординат соединяют плавными кривыми и определяют площади фигур, ограниченных этими кривыми и осью абсцисс. Площади фигур численно равны соответственно сумме сдвигающих и удерживающих сил. Коэффициент запаса устойчивости откоса определяется как отношение площади эпюр удерживающих и сдвигающих касательных напряжений. При расчете устойчивости обводнения откосов, сложенных подверженными влиянию гидростатического взвешивания породами, сопротивление сдвигу в каждой точке поверхности скольжения снимается с графика сопротивления сдвигу при нормальном

напряжении, уменьшенном на величину гидростатического давления.

Если поверхность скольжения не является монотонной и криволинейной, то для расчетов устойчивости применяют модификации метода многоугольника сил. При этом используют значения C и φ для консолидированного глинистого грунта и дополнительно учитывают поровое давление, а также равнодействующую сил гидродинамического давления и гидростатического взвешивания.

При наличии графиков сопротивления глинистых пород сдвигу, соответствующих различным стадиям их уплотнения, расчет устойчивости ведется при значениях C и φ , которые получены по тотальным напряжениям. Графики $\tau = f(\sigma_n)$ принимают с учетом соответствующих расчетным моментам времени значений степени уплотнения.

В случае криволинейной монотонной поверхности скольжения метод многоугольника сил применяют для проверочных расчетов. При использовании метода многоугольника сил коэффициент запаса устойчивости откосов определяют построением замкнутого многоугольника при расчетных значениях параметров сопротивления сдвигу

$$\varphi_p = \arctan \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\eta} \right); \quad C_p = \frac{C}{\eta}$$

или введением значения η в расчетную величину сдвигающих сил, которая для одного блока массой P с углом наклона основания α_i имеет вид $T_i^p = \eta P_i \sin \alpha_i$.

Универсальность и математическая обоснованность метода многоугольника сил дают основание рекомендовать его для проведения массовых расчетов, трудоемкость которых существенно снижается при применении электронных вычислительных машин.

При углах откоса менее 45° и большом числе блоков границы между ними можно принимать вертикальными, а направления реакций — совпадающими с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока [22]. Тогда реакция между блоками определяется по формуле

$$E = \frac{\eta P_i \sin \alpha_i - (P_i \cos \alpha_i - P_{\kappa i}) \operatorname{tg} \varphi_i - C_i l_i + E_{i-1}}{\cos \delta_i + \sin \delta_i \operatorname{tg} \varphi_i}, \quad (\text{III.9})$$

где P_i — масса пород в пределах блока; α_i — угол наклона основания блока; $\delta_i = \alpha_i - \alpha_{i+1}$ — угол наклона реакции E_i к основанию i -го блока.

Коэффициент запаса вводится лишь для блоков в пределах призмы активного давления. Условием равновесия откоса при коэффициенте запаса η является равенство нулю реакции E_n для последнего блока. С помощью ЭВМ легко производится перебор значений η для получения $E_n = 0$ с заданной точностью. Контуры оползневого клина при введении данных в выражение (III.9) должны задаваться уравнениями.

Так как при намыве гидроотвалов значительная часть сечения упорных призм и все внутренние зоны являются обводненными, допустимые параметры гидроотвалов следует устанавливать с учетом режима фильтрации в откосы упорных призм и инфильтрационных потерь.

Наиболее представительными являются исследования режима фильтрации при гидроотвалообразовании, выполненные в бассейне КМА во ВНИМИ (Ю.А. Норватов и др.) и НИИКМА (М.А. Дергилев и др.) применительно к условиям крупнейшего гидроотвала "Березовый Лог" [2, 23].

Полевые исследования ВНИМИ для периода, когда в гидроотвал ежегодно укладывалось до 20 млн. м³ гидровскрьши (при Т:Ж = 1:10), позволили сделать следующие выводы: общие потери воды из гидроотвала составляли 4000 м³/ч (эти потери восполнялись за счет водозабора на р. Осколец); потери воды на фильтрацию через основание и дамбу гидроотвала равнялись 1400—1700 м³/ч, из них 1200—1500 м³/ч шло непосредственно на инфильтрацию в надьюрский водоносный горизонт, залегающий в основании гидроотвала; суммарные потери воды на испарение достигали 1400—1700 м³/ч; уровни надьюрского водоносного горизонта фиксировались на 15 м ниже подошвы суглинков, залегающих в основании гидроотвала.

В результате аналогового моделирования установлено: суммарная величина инфильтрационных потерь составляет 1500 м³/ч; среднее повышение уровней надьюрского горизонта под гидроотвалом достигает 10—12 м. Исследованиями ВНИМИ доказано, что гидроотвал "Березовый Лог" имеет существенное значение как источник питания надьюрского водоносного горизонта; инфильтрационный расход из гидроотвала составлял 20 % суммарной производительности дренажных систем Лебединского и Южно-Лебединского карьеров. Для сокращения инфильтрационных потерь необходимо создать дополнительные пути фильтрации в намывном массиве гидроотвала, обеспечивающие увеличение объемов воды, поступающих в прудок-отстойник.

Основными задачами выполненных в НИИКМА исследований являлись:

- определение положения депрессионной поверхности в зависимости от высоты гидроотвала и длины пляжной зоны при отсутствии намыва (установившаяся фильтрация);

- изучение характера фильтрации при наличии движущегося конуса растекания гидросмеси в процессе намыва (неустановившаяся фильтрация);

- оценка положения депрессионной поверхности при многократном (часто повторяющемся) движении конуса растекания в пределах одного и того же участка упорной призмы.

Перечисленные задачи решались для условий гидроотвала "Березовый Лог" с использованием методов гидравлических аналогий на гидроинтеграторе В.С. Лукьянова. Анализ режима неустановившейся фильтрации показал, что с увеличением высоты упорной призмы с 44 до 74 м при постоянной длине пляжа 170—190 м максимальный подъем депрессионной поверхности составляет 14—20 м. Установлено также, что максимальное повышение депрессионной поверхности под влиянием конуса растекания приурочено к первой трети пляжа (начальной части приоткосной зоны). Общее обводнение профиля призмы с увеличением длины пляжа

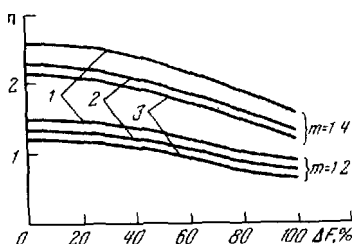


Рис. 17. Зависимости коэффициента запаса устойчивости η от площади ΔF обводненной части поперечного сечения упорной призмы:

1, 2, 3 — при высоте призмы соответственно 20, 50 и 100 м

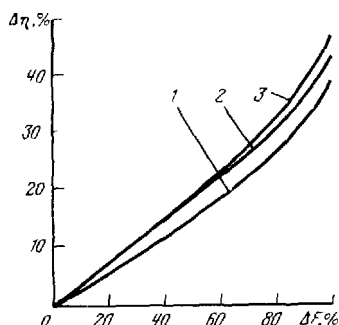


Рис. 18. Зависимость $\Delta\eta$ от ΔF при заложении откоса $m = 1:4$:

1, 2, 3 — при высоте призмы соответственно 20, 50, 100 м

уменьшается. Под влиянием конуса растекания приращение площади обводнения пляжной зоны изменяется в пределах 7–28 % и достигает максимальных значений с увеличением высоты призмы и длины пляжной зоны. Максимальные значения притока к откосу отмечаются при намыве до отметки 220 м (высота призмы 74 м): при установившейся фильтрации — 1270 м³/сут, или 1,2 м³/ч (единичный расход); при неустановившейся фильтрации — 1440 м³/сут, или 1,4 м³/ч.

Влияние длительного выпуска гидросмеси на одном участке оценивалось путем моделирования на приборе ЭГДА 9/60. Установлено, что за счет длительной фильтрации из конуса растекания местный подъем уровня в профиле призмы достигает 20–22 м, а площадь обводнения поперечного профиля упорной призмы может увеличиться с 60 до 90 %.

На рис. 17, 18 представлены полученные М.А. Дергилевым зависимости коэффициента запаса устойчивости η упорной призмы гидроотвала и его изменения $\Delta\eta$ от площади обводненной части ее поперечного сечения ΔF . Отмечается существенное снижение (на 30–40 % по сравнению с сухим откосом) величины η за счет влияния гидравлических сил [см. формулу (III.6)].

В НИИКМА разработана также методика количественной оценки влияния сейсмического эффекта массовых взрывов на устойчивость дамб гидроотвалов путем уменьшения сил трения и увеличения сдвигающих сил [см. формулы (III.6)]. Зависимости для расчета сейсмических сил даны в работе [24]. Установлено, что за счет сейсмического действия взрывов коэффициент запаса устойчивости η дамбы гидроотвала при увеличении ее высоты с 44 до 74 м снижается в пределах 1,5–3,8 %. В среднем величина η снижалась на 2 % за счет сейсмического действия взрывов при массе взрывааемого ВВ в группе $Q = 5000$ кг и расстоянии от места

взрыва до откоса 1000 м. Значительное снижение η (на 10–15 %) возможно при уменьшении расстояния от места взрывов на 250–500 м и увеличении массы ВВ в группе сверх 5000 кг при интервале замедления 35–50 мс.

Таким образом, для большинства гидроотвалов упрощенный учет сейсмических сил возможен путем снижения коэффициентов запаса устойчивости дамб на 2–5 %.

Для многовариантных расчетов устойчивости сложенных раздельно-зернистым материалом упорных призм гидроотвалов в МГИ используется выражение (III.6), с помощью которого определяется коэффициент запаса устойчивости при заданном положении кривой скольжения.

В качестве исходных данных для расчета приняты те параметры, которые влияют на устойчивость массива: угол внутреннего трения, коэффициент сцепления, плотность грунта, уровень депрессионной кривой, конфигурация намытого сооружения. При этих исходных данных можно в широком диапазоне изменять положение возможной кривой скольжения.

Нестабилизированное состояние сложенного глинистыми породами основания учитывается путем принятия значений C и φ , соответствующих заданной степени уплотнения.

В качестве результатов расчета получаются значения коэффициента запаса устойчивости, а также суммы сдвигающих и удерживающих сил нарастающим итогом, анализ которых может оказаться полезным для определения мероприятий по повышению устойчивости дамбы.

Используемая в МГИ программа на языке ПЛ/1 допускает проведение расчетов при наличии в массиве трех слоев пород с различными физико-механическими свойствами (например, 1-й слой — крупнозернистый материал в теле дамбы, 2-й слой — мелкозернистый материал в теле дамбы, 3-й слой — основание дамбы).

Методика расчета с использованием разработанной программы заключается в определении коэффициента запаса устойчивости по предполагаемым кривым скольжения с различным положением их в теле дамбы. При этом выявляется кривая скольжения с наименьшим значением коэффициента запаса. После этого для уточнения состояния намытого массива в районе "наислабейшей кривой" производятся дополнительные расчеты по кривым скольжения, начало и конец которых совпадают с "наислабейшей кривой", но кривизна которых различна.

Для подготовки исходных данных необходимо на поперечном разрезе откоса дамбы и ее основания, выполненном в одном вертикальном и горизонтальном масштабе, показывать границы слоев с различными физико-механическими свойствами и положение кривой депрессии. Профиль разбивается на равные по ширине блоки, по сторонам которых отсчитывается расстояние от поверхности дамбы, границ слоев, кривых депрессии и скольжения до горизонтальной базовой линии, проведенной по верху дамбы. Вводимая информация состоит из одномерных массивов.

Использование расчетов по данной программе позволяет выполнить

оценку эффективности различных мероприятий по повышению устойчивости дамбы гидроотвала:

снижения депрессионной кривой за счет дренажа упорной призмы; изменения конфигурации дамбы за счет пригрузки низового откоса и др.;

сооружения дренажной призмы во внутренней зоне.

Результаты расчетов также используют для оперативного контроля устойчивости откосных сооружений по графикам $\eta = f(S_{pw})$, где S_w — площадь эпюры давления воды по поверхности скольжения.

Оценка устойчивости откосных сооружений гидроотвалов в производственных условиях с использованием оперативной натурной информации о положении депрессионной кривой, степени уплотнения и параметрах сопротивления сдвигу намывных масс и грунтов естественных оснований может выполняться с помощью программируемых микрокалькуляторов (типа БЗ-34, МК-56 и т. д.).

В МГИ применяют микроЭВМ для расчетов устойчивости откосов упорных призм рассмотренными выше инженерными методами.

Метод многоугольника сил используется также для определения массы пригрузки низового откоса упорной призмы гидроотвала, которая обеспечивает достижение нормативного коэффициента запаса устойчивости при заданной конфигурации откоса. Некомпенсированное оползневое давление E_n определяется по формуле (III.9), а необходимая масса пригрузки P_n — из выражения

$$P_n = \frac{E_n \eta}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{конт}}}, \quad (\text{III.10})$$

где $\varphi_{\text{конт}}$ — угол трения по контакту пригрузки и основания.

III.2. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И УПЛОТНЕНИЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

При оценке устойчивости сухих отвалов, размещаемых на слабых намывных основаниях, а также при решении вопросов рекультивации внутренних зон гидроотвалов и хвостохранилищ необходимо выполнить проверку несущей способности грунтов с использованием методов предельного напряженного состояния.

Для разработки мероприятий по последующему использованию намывных территорий требуется определять продолжительность периода консолидации тонкодисперсных водонасыщенных грунтов, по истечении которого эти грунты преобретают достаточную несущую способность и становятся возможными рекультивационные работы или формирование сухих отвалов на намывных основаниях.

Продолжительность "отдыха" намывных тонкодисперсных грунтов устанавливается на основе решений задач уплотнения и предельного напряженного состояния грунтов. Внешняя нагрузка рассматривается как по-

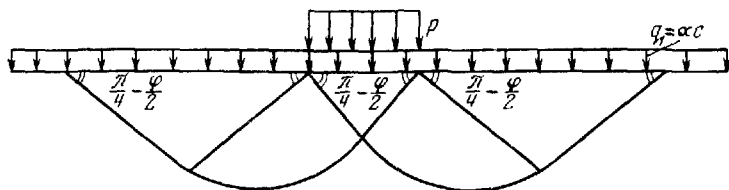


Рис. 19. Расчетная схема к оценке несущей способности намывного основания

ловская (при формировании дренажных призм в тонкодисперсных грунтах и отсыпке заходок сухих отвалов) и как прямоугольная при учете действия массы оборудования, используемого для рекультивации.

Различаются начальное критическое давление P_n , при котором порода находится в фазе уплотнения, и предельное критическое $P_{пр}$, при котором исчерпывается полностью несущая способность грунта [25]. Приближенная оценка устойчивости откосов на слабых основаниях или проходимости оборудования выполняется путем сравнения действующего давления с предельным критическим

$$P_{пр} = 5,14C + q_1, \quad (III.11)$$

где q_1 — давление от подушки из дренирующего материала, предварительно укладываемой для подготовки слабых оснований (при отсутствии подушки $q_1 = 0$).

Для осесимметричной пространственной задачи (площадь загрузки ограничена кругом или квадратом)

$$P_{пр} = 5,7C + q_1. \quad (III.12)$$

Расчетная схема к оценке несущей способности намывного основания дана на рис. 19.

Для оценки максимальной несущей способности основания используется формула Прандтля — Рейснера:

$$\begin{aligned} P_{пр}/C &= (\alpha + \operatorname{ctg} \varphi) (1 + \sin \varphi) \exp(\pi \operatorname{tg} \varphi) - \operatorname{ctg} \varphi (1 - \\ &\div \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi), \end{aligned} \quad (III.13)$$

где q_1 — предварительно приложенное к основанию уплотняющее давление (от предотвала или намывной подушки), равное αC .

Для расчетов по формуле (III.13) при $\alpha = 0 \div 10$ построен график к определению $P_{пр}/C$ в зависимости от φ (рис. 20). Несущая способность основания по отношению к заданной нагрузке $P_{доп}$ обеспечивается при $P_{доп} = P_{пр}/\eta$ ($\eta = 1,2$).

Применительно к задачам определения продолжительности "отдыха" намывных массивов с позиций их рекультивации или укладки "сухих" отвалов рассматривается уплотнение выделяемых из намывной толщи расчетных слоев, мощность которых h_p определяется глубиной залегания

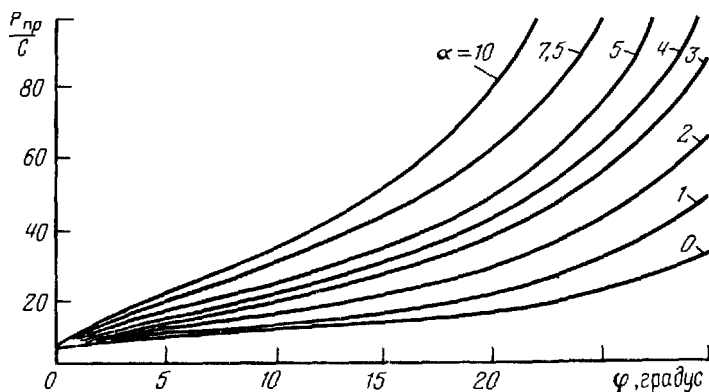


Рис. 20. Графики зависимости $P_{\text{пр}}/C$ от φ при различных значениях α

нижней границы области предельного состояния намывных грунтов с учетом условия [26]

$$\tau_{\text{max}} = \tau_k, \quad (\text{III.14})$$

где τ_{max} — максимальное касательное напряжение, равное при полосовой нагрузке интенсивностью P $0,3P$; τ_k — сопротивление грунтов сдвигу (вращательному срезу).

Принимая расчетную нагрузку от рекультивационного оборудования $P_{\text{обор}} = 0,15$ МПа и $\eta = 1,2$, получаем $\tau_{\text{max}} = 0,054$ МПа. Данные зондирования поворотными крыльчатками гидроотвалов Кузбасса и КМА показывают, что в период формирования толщ тонкодисперсных грунтов (т. е. при $t_0 = 0$) общей мощностью 15–60 м величина $h_p = 10$ –25 м.

При оценке общей устойчивости дамб гидроотвалов следует определять степень уплотнения всей намывной толщи, так как она пересекается вероятными кривыми скольжения на полную мощность. В этом случае по известной величине степени уплотнения приблизительно определяют соответствующие характеристики сопротивления сдвигу намывных масс путем интерполяции с использованием значений C и φ при $U = 0$ и $U = 1$.

Для приближенного установления степени уплотнения намывных толщ, обеспечивающей достаточную несущую способность, в полученные по формулам (III.11–III.13) при известном $P_{\text{пр}}$ значения C вводят коэффициент запаса η и затем по расчетной величине $C_p = \eta C$ определяют путем интерполяции величину $U = C_p - C_3 / C_k - C_3$, где C_3 и C_k — соответственно сцепление для неконсолидированного ($U = 0$) и консолидированного ($U = 1$) грунта.

С использованием решения задачи об уплотнении намывного слоя (перемежной мощности) под действием собственной массы слагающих его грунтов после прекращения намыва по графикам на рис. 11 для известных значений степени уплотнения U и параметра $\mu = h\nu_n/C_p$ (h — мощность

слоя, м; v_n – скорость намыва, м/год; C_v – коэффициент консолидации породы, м²/год) определяется параметр $m = \pi^2 C_v t_0 / (4h_p^2)$.

Продолжительность периода "отдыха" слоя t_0 , по истечении которого территория гидроотвала пригодна для последующего использования, устанавливается из соотношения

$$t_0 = \frac{4mh_p^2}{\pi^2 C_v}. \quad (\text{III.15})$$

Таким образом, изложенная методика позволяет решать две группы задач:

определять степень уплотнения намывных толщ (расчетным путем или с помощью натурных замеров порового давления) и затем устанавливать величину допустимых внешних нагрузок;

по величине внешней нагрузки от рекультивационного оборудования или дополнительных объемов вскрыши устанавливать продолжительность периода "отдыха" гидроотвала.

Установление продолжительности периодов "отдыха" намывных массивов под действием собственной массы слагающих их грунтов ("пассивного отдыха") позволяет разработать мероприятия по направленному изменению состояния массивов с целью форсирования консолидации и ускоренного достижения необходимой несущей способности.

В случае применения песчаных дрен и дренажных прорезей расчеты прочности намывных оснований могут выполняться способами, применяемыми в строительной практике [15].

По первому способу в основании строят поверхности скольжения, по которым определяют сдвигающие и удерживающие силы с учетом значений порового давления в соответствующих точках для различных моментов времени.

Второй способ расчета прочности основания предусматривает учет изменений влажности в процессе консолидации и использование зависимостей сопротивления грунтов сдвигу от влажности. М.Ю. Абелевым дано экспериментальное обоснование использования для случаев применения вертикальных и горизонтальных дрен следующей зависимости, предложенной Н.Н. Масловым [15]:

$$W_t = W_{\text{нач}} - (W_{\text{нач}} - W_{\text{кон}}) U_{\Sigma},$$

где W_t – влажность грунта в момент t , %; $W_{\text{нач}}$ – начальная влажность в момент приложения нагрузки, %; $W_{\text{кон}}$ – влажность грунта после окончания его уплотнения под данной нагрузкой, %; U_{Σ} – общая степень консолидации, определяемая для случая совместного применения вертикальных песчаных дрен или прорезей и песчаной подушки.

Выполненные М.Ю. Абелевым натурные эксперименты проводились с дренажными прорезями неглубокого заложения (около 2 м). Для оперативного контроля и прогноза состояния намывных горнотехнических сооружений следует использовать методы, обеспечивающие надежную оценку пространственно-временной изменчивости прочностных характеристик массивов, мощность которых измеряется десятками метров.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАМЫВНЫХ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ****IV.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ**

Расчетные параметры физико-механических свойств намывных тонкодисперсных грунтов и оснований устанавливаются на основе лабораторных или натурных экспериментов. Перечень показателей физико-механических свойств грунтов оснований и тела гидротехнических сооружений и нормативных документов (ГОСТов) по их определению дан в СНиП П-16-76, СНиП 2.06.05-84 и в работе [20].

Объем инженерно-геологических изысканий на территориях намывных сооружений зависит от сложности геологического строения и гидрогеологических условий, степени изученности района, стадии с грунтами основания. Состав инженерно-геологических изысканий регламентируется СНиП П-9-78 и СНиП 2.01.14-83.

Проходка разведочных выработок производится обычно по створам, совпадающим с возможными трассами ограждающих дамб и водосбросных устройств. Для сравнения нескольких вариантов расположения дамб разведочные работы должны выполняться в объеме, достаточном для проведения сравнительной инженерно-геологической оценки всех положений оси дамбы. В дополнение к основному створу (после выбора оптимального варианта) необходимо бурение скважин по двум примерно перпендикулярным к нему линиям и на площади гидроотвала. Объем работ по этим двум линиям не должен превышать объема работ по основному створу.

Для гидроотвалов равнинного типа с однородными и слоистыми основаниями среднее расстояние между инженерно-геологическими скважинами по оси дамбы изменяется соответственно в следующих пределах: 100-200 м и 50-100 м. Расстояние между скважинами по оси дамбы для гидроотвалов, размещаемых в овражно-балочной сети и поймах, составляет 50-100 м.

Применительно к решению задач формирования отвальных насыпей на гидроотвалах значительный объем исследований на намывных объектах Кузбасса выполнен ВНИМИ [7, 32]. Выделяются три категории сложности инженерно-геологических условий гидроотвалов: I — простые; II — средней сложности; III — сложные. Категории сложности устанавливаются в зависимости от положения гидроотвала по отношению к зоне влияния открытых и подземных горных работ, преимущественного состава намывных грунтов и степени их уплотнения.

В работе ВНИМИ отмечается необходимость проведения инженерно-геологических исследований намывных массивов тонкодисперсных грунтов в две стадии, соответствующие двум стадиям проектирования. На первой стадии рекомендуется проводить рекогносцировочные исследо-

Таблица 9

Вид инженерно-геологических работ	Число точек опробования по категориям сложности инженерно-геологических условий гидроотвала		
	I	II	III
Буровые работы (отбор образцов пород) Полевые исследования физико-механических свойств (вращательный срез, статическое зондирование, прессиометрия, радиометрия, зондирование датчиками) Опытно-промышленные эксперименты	3 6 Один эксперимент в прудковой зоне	5 10 По одному эксперименту в каждой из выделенных зон	6 10 Один-два эксперимента в каждой из выделенных зон

вания, на второй — предварительные, детальные и дополнительные. Инженерно-геологическое районирование гидроотвала предлагается выполнять по окончании детальных исследований. Основной задачей дополнительных исследований считается оперативный контроль состояния различных зон гидроотвала в период укладки на его территории сухого отвала.

Для ориентировочного определения густоты сети инженерно-геологического опробования может использоваться составленная ВНИМИ табл. 9.

Однако в реальной постановке инженерно-геологических исследований на территориях намывных горнотехнических сооружений имеются существенные недостатки:

инженерные изыскания на различных стадиях проектирования в ряде случаев включают лишь топогеодезические работы, а инженерно-геологические изыскания не выполняются;

при возникновении оползневых деформаций ограждающих дамб в период эксплуатации сооружений приходится выполнять инженерно-геологическое опробование сильносжимаемых грунтов оснований путем бурения скважин через тело дамбы или толщу намывных грунтов, что приводит к неизбежному удорожанию работ;

в проектах гидроотвалов и хвостохранилищ обычно не предусматривается оперативный контроль состояния внутренних зон намывных массивов, необходимый для корректировки технологии намывных работ, увеличения вместимости сооружений и подготовки их к рекультивации.

На кафедре геологии МГИ Б.К. Лапочкиным разработаны схемы инженерно-геологического опробования намывных тонкодисперсных грунтов, учитывающие влияние технологических, инженерно-геологических и физико-географических факторов на формирование намывного массива. Однако реализация этих схем в полном объеме затруднительна в связи с перечисленными выше недостатками организационно-технического плана.

Необходимое число однородных (в отношении водно-физических свойств, вещественного состава грунтов, глубины зондирования или отбора монолитов) механических испытаний (натурных и лабораторных) следует определять с использованием разработанных ВНИИМИ рекомендаций по изучению инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом [33].

Необходимое число испытаний для каждого инженерно-геологического слоя в пределах бортового или отвального массива определяется из соотношения

$$n = (tv/\epsilon_{\bar{u}})^2,$$

где t — статистический коэффициент, зависящий от общего числа испытаний и заданной вероятности (критерий Стьюдента); v — коэффициент вариации; $\epsilon_{\bar{u}}$ — относительная ошибка определения сопротивления сдвигу.

Для расчета необходимого числа испытаний следует исходить из требуемой точности, определяемой величиной максимальной относительной ошибки $\Delta_{\bar{u}} = \epsilon_{\bar{u}}$ (где \bar{u} — среднее значение). Коэффициент t в этом случае принимается в зависимости от выбираемой надежности (доверительной вероятности) P_t , исходя из нормального закона распределения вероятностей

$$P_t = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

В связи с тем, что параметр t (коэффициент вероятности) зависит от n , необходимое число испытаний получается итерационным способом. При обработке результатов механических испытаний песчано-глинистых и полускальных пород величина принимается обычно равной 0,95.

Для реального диапазона значений коэффициента вариации ($v = 10 \div 20 \%$) и заданной точности $\epsilon_{\bar{u}} = 5 \div 7 \%$ число испытаний каждого однородного слоя меняется от 10 до 50. Число испытаний при каждом нормальном напряжении (глубине) является частным от деления общего числа испытаний на число ступеней нормальных нагрузок (интервалов зондирования). С учетом вышеизложенного общее число натурных испытаний (методами вращательного среза или прессиометрическим) принималось при одной глубине зондирования $n \geq 4$, а число испытаний на консолидацию, трехосное сжатие или плоскостной срез в заданном режиме (неконсолидированно-недренированные или консолидированно-недренированные испытания) при постоянном нормальном напряжении принималось $n \geq 4$.

Для установления расчетных показателей сопротивления сдвигу определялись следующие статистические характеристики:

среднее арифметическое значение $\bar{\tau}$ или $\bar{\sigma}_{xy}$ (для ряда значений τ , полученных при одной глубине зондирования и нормальном давлении на приборах плоскостного среза или бокового давления σ_{xy} при каждой ступени нормального давления в лабораторных трехосных испытаниях)

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i n_i,$$

где n_i — частота.

Стандарт выборки

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\tau_i - \tau)^2 n_i}.$$

Коэффициент вариации

$$v = S/t \cdot 100 \, \%.$$

Расчетные значения определялись из выражения

$$\tau_{\text{расч}} = \bar{\tau} - s = \tau(1 - v).$$

С использованием $\tau_{\text{расч}}$ и $\sigma_{xy}^{\text{расч}}$ строили графики сопротивления сдвигу, положение которых определяли способом наименьших квадратов. Аналогичным образом устанавливали расчетные показатели деформируемости грунтов.

Для оценки характера связей между изучаемыми при инженерно-геологических исследованиях параметрами используются следующие основные статистики: коэффициент корреляции, корреляционное отношение, показатель корреляции рангов, а также множественные и частные коэффициенты корреляции и корреляционные отношения.

Наиболее часто для установления связи между двумя факторами, представленными соответствующими рядами значений, используют коэффициент корреляции r , определяемый по формуле

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y},$$

где \bar{x} и \bar{y} — средние значения соответствующих рядов x_i и y_i в отдельности; s_x и s_y — соответствующие средние квадратичные отклонения.

Значения r могут изменяться в интервале ± 1 , при этом $r = +1$ указывает на прямо пропорциональную, а $r = -1$ — на обратно пропорциональную функциональную связь между исследуемыми факторами. Если $r = 0$, то это свидетельствует только о некоррелированности рассматриваемых величин, поскольку они необязательно независимы.

Коэффициент корреляции служит мерой связи только в случае линейной корреляции между факторами. Если же корреляция нелинейна, тогда этот показатель утрачивает свое значение в качестве меры связи и в этом случае применяют корреляционное отношение $\eta_{yx}/(\eta_{xy})$, равное корню квадратному из среднего значения квадратов условных основных моментов первого порядка для рассматриваемых рядов значений x и y (Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971). Величина η изменяется от 0 до 1, причем значение $\eta = 0$ имеет тот же смысл, что и для коэффициента корреляции.

В случае линейной связи между факторами $r = \eta$ во всех остальных $r_{xy}^2 < \eta_{yx}^2$.

Рассмотренные статистики являются параметрическими и требуют предварительного определения формы связи (обычно графическим путем).

В целях оперативного определения наличия или отсутствия связи между двумя факторами целесообразно применять коэффициент корреляции рангов ρ , являющийся непараметрическим и, следовательно, нечувствительным к форме исследуемой зависимости.

Под рангом понимается числовое обозначение каждого члена упорядоченного ряда значений исследуемого фактора, расположенного по возрастанию или убывающим номерам.

Величина ρ определяется из выражения

$$\rho = 1 - \frac{\frac{1}{6} \sum_{h=1}^n \Delta d_h^2}{n(n^2 - 1)},$$

где Δd_h — разность рангов связанной пары значений y_i и x_i ; n — число пар значений, включенных в подсчет.

Значение ρ изменяется от -1 до $+1$; чем ближе абсолютное значение ρ к единице, тем теснее связь между факторами; знак показателя корреляции рангов указывает, является связь прямой или обратной.

Значимость полученной величины ρ определяется обычно по критерию t :

$$t_{\text{расч}} = \frac{\rho \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}},$$

если $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ при заданном уровне значимости (обычно $0,05$), то величина ρ показывает тесноту исследуемой связи. Значения $t_{\text{табл}}$ берутся в справочниках по математической статистике.

Методы расчета системы пунктов получения информации (спинф) при инженерно-геологических исследованиях рассмотрены Г.К. Бондариком в работе "Методика инженерно-геологических исследований" (М., "Недра", 1986). Применительно к намывным массивам целесообразно реализовать пространственно-временные спинфы, объем которых

$$\tilde{N} = NT(n_i + n_e),$$

где \tilde{N} — объем пространственного спинфа; T — полный расчетный период его функционирования; n_i — частота наблюдений в год при нормальном режиме изучаемого свойства геологической среды; n_e — частота наблюдений в год при экстремальных значениях наблюдаемого параметра (сопротивления сдвигу, модуля деформации, степени уплотнения, определяемой через значения осадок и порового давления, и т. д.).

Параметрами регулярного (с примерно постоянными расстояниями между центрами зон вариации наблюдаемых параметров по различным направлениям ξ_1, ξ_2, ξ_3) спинфа в латеральной (ξ_1, ξ_2) плоскости являются шаги $\Delta \xi_1$ и $\Delta \xi_2$, по глубине — интервал $\Delta \xi_3$. Параметры трехмерного спинфа Г.К. Бондарик предлагает определять по следующим формулам:

$$\Delta \xi_1 = \frac{L \xi_1}{\sqrt[3]{n D_{\xi_1}^2 / (D_{\xi_1} D_{\xi_3})}},$$

$$\Delta \xi_2 = \frac{L \xi_2}{\sqrt[3]{n D_{\xi_2}^2 / (D_{\xi_1} D_{\xi_3})}},$$

$$\Delta \xi_3 = \frac{L \xi_3}{\sqrt[3]{n D_{\xi_1}^2 / (D_{\xi_2} D_{\xi_3})}},$$

где $n = n_1 n_2 n_3$ — объем сплинфа; n_1, n_2, n_3 — число пунктов получения информации по главным направлениям и по глубине; $D_{\xi_1}, D_{\xi_2}, D_{\xi_3}$ — дисперсии исследуемого показателя по трем направлениям; $L \xi_1, L \xi_2, L \xi_3$ — соответственно размеры опробуемого геологического тела по ξ_1, ξ_2 и его мощность (по ξ_3).

Параметры трехмерного сплинфа должны удовлетворять условию

$$\Delta \xi_1 \Delta \xi_2 \Delta \xi_3 \geq V_{\text{корр}} = r_{\xi_1} r_{\xi_2} r_{\xi_3},$$

где $V_{\text{корр}}$ — область автокорреляции (статистическая проба).

Временной параметр — период времени между наблюдениями Δt может определяться как параметр одномерной системы пунктов получения информации по условию обеспечения заданной точности наблюдений. Величина Δt может также определяться исходя из требования, чтобы среднее квадратическое отклонение оценки среднего значения случайного процесса от его математического ожидания не превысило заранее заданной величины.

При инженерно-геологическом опробовании намывных массивов расчет количества, площади и формы ключевых участков-эталонов целесообразно производить с использованием методики Г.К. Бондарика.

В процессе возведения сооружения целесообразно дополнительное количественное обоснование требуемого объема определений свойств намывных грунтов на основе графиков зависимости среднего квадратического отклонения или выборочной энтропии от числа экспериментов. Выполнение этих графиков свидетельствует о том, что дальнейшее проведение экспериментов данного типа лишено смысла.

Особый интерес представляет изучение влияния распределения параметров на распределение результирующих оценок решаемой инженерной задачи. М.В. Фацем в рамках теории функций случайных переменных решен ряд конкретных задач опробования. Задачи подобной направленности решались также применительно к опытно-фильтрационным работам [27, 28].

Вопросы планирования экспериментов при исследовании свойств складываемых отходов рудообогащения рассмотрены в работе [5], где освещаются возможности многофакторного планирования на примере построения интерполяционных моделей деформационных и прочностных показателей замороженных хвостов.

Как отмечают В.А. Мироненко, В.М. Шестаков, М.В. Рац [27, 28], стандартный статистический анализ в его модификациях, характерных для массовых инженерно-геологических работ, часто бесполезен, а иногда

приводит даже к отрицательным последствиям ввиду недоучета физико-механической природы отдельных показателей, характера возможных функциональных связей между ними, чувствительности к ним расчетного алгоритма и т. д. Из-за решающего влияния масштабных эффектов, обусловленных механической неоднородностью и анизотропией изучаемого массива, стандартные полевые и тем более лабораторные методы определения параметров прочности и деформируемости дают во многих случаях нереальные результаты.

Экспериментальные исследования должны обеспечить получение данных, необходимых для инженерно-геологической схематизации системы намывной массив — основание. Схематизация рассматривается как связующее звено между геологической основой изучаемого объекта и его механическим описанием (расчетной моделью).

При постановке изысканий (инженерно-геологических наблюдений) схематизация должна обязательно учитывать условия работы сооружения. Только в этом случае инженерно-геологическое районирование намывных территорий будет иметь смысл.

С учетом техногенного характера намывных грунтов для получения их расчетных характеристик первостепенное значение приобретают натурные наблюдения (на стадии проектирования — на объектах-аналогах или при опытных намывах, на стадии возведения — непосредственно на действующем объекте). При этом для установления роли отдельных факторов, определения расчетных параметров и законов изучаемых процессов следует использовать решения обратных геомеханических задач.

При выборе основных объектов исследования ставилась цель изучения состояния намывных масс, имеющих различный "возраст", оказывающий определяющее влияние на свойства тонкодисперсных техногенных отложений гидроотвалов (при их постоянном вещественном составе).

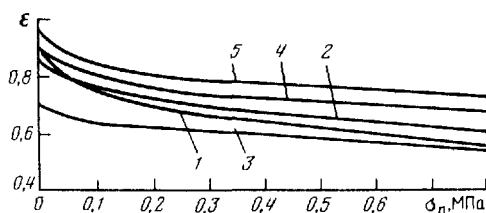
Зондирование и отбор образцов-монолитов на гидроотвалах производили по линиям-створам, ориентированным примерно перпендикулярно и параллельно фронту намыва. Число скважин устанавливали в соответствии с требованиями обеспечения представительных результатов натуральных и лабораторных испытаний, а также с учетом опыта, теории и методики инженерно-геологического опробования.

Обработку данных зондирования производили с учетом результатов лабораторных исследований, использовавшихся при определении границ основных зон гидроотвалов: приоткосной (пляжной), промежуточной и прудковой. Последние две зоны иногда объединяли под общим названием *ядерной* (при отсутствии данных для разделения).

IV.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе лабораторных испытаний определяли следующие характеристики намывных масс и пород оснований гидроотвалов: показатели водно-физических свойств (влажность, плотность, плотность минеральных частиц, пористость, водонасыщенность); показатели компрессии и

Рис. 21. Зависимости коэффициента пористости ϵ от уплотняющего давления σ_n для тонкодисперсных грунтов различных участков гидроотвала "Березовый Лог" (КМА)



консолидации; сопротивление сдвигу; гранулометрический состав; минеральный состав и микростроение.

Водно-физические свойства пород гидроотвалов определяли как в период производства полевых работ, так и в стационарной лаборатории. Для механических испытаний использовали универсальные стабилометры М-2 конструкции МИИТа и УСВ-2 конструкции ВЮГЕМа, а также сдвиговый и компрессионно-фильтрационный приборы конструкции Гидропроекта. Гранулометрический состав определяли с помощью комбинированного гранулометрического анализа, предусматривающего использование ситового и пипеточного методов.

На рис. 21 представлены обобщенные компрессионные зависимости тонкодисперсных грунтов различных участков гидроотвала "Березовый Лог": глинисто-меловых линз в теле песчаной упорной призмы 1, глинисто-меловых паст двух участков первой 2, 3 и второй 4, 5 секций ядерной зоны.

Компрессионные зависимости глинистых пород пляжных и ядерных зон гидроотвалов Кузбасса также свидетельствуют об увеличении сжимаемости намывных масс при повышении их дисперсности (рис. 22).

Для прогноза уплотняемости и оценки устойчивости тонкодисперсных водонасыщенных породных масс с учетом их нестабилизированного состояния необходимо располагать данными об изменении коэффициента консолидации во времени под действием возрастающих нагрузок. Этот коэффициент обычно определяется из выражения $C_v = K_\phi + (1 + \epsilon_{cp})/a \gamma_v$.

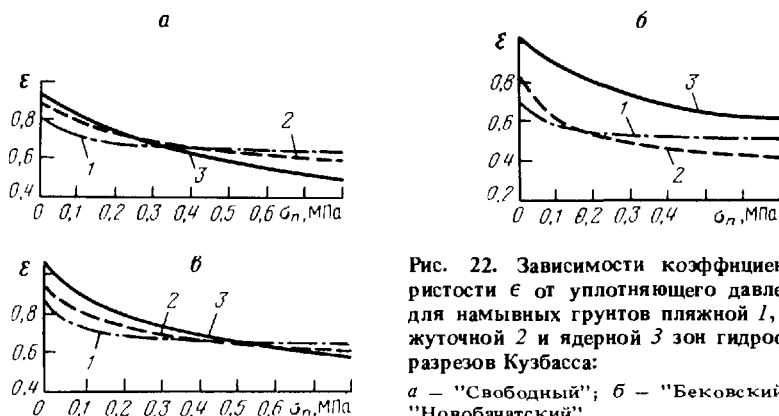


Рис. 22. Зависимости коэффициента пористости ϵ от уплотняющего давления σ_n для намывных грунтов пляжной 1, промежуточной 2 и ядерной 3 зон гидроотвалов разрезов Кузбасса:

а — "Свободный"; б — "Бековский"; в — "Новобачатский"

Таблица 10

Порода	Плотность, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность, %	Начальный коэффициент порис- тости	Коэффици- ент водо- насыщения
Суглинок коренной лёс- совидный (основание)	1,99	2,71	24,3	0,68	0,97
Суглинки гумусирован- ные (основание)	1,86	2,64	33,8	0,89	1,0
Глинисто-меловые пасты (намывные)	1,91	2,68	31	0,83	1,0
Песок намывной	1,95	2,65	23,8	0,63	1,0

Прогнозирование осадок и динамики порового давления в тонкодисперсных водонасыщенных породных массах осложняется тем, что их сжимаемость зависит от прилагаемого давления, а коэффициент фильтрации существенно снижается в процессе уплотнения.

Коррективы в приведенные выше формулы для расчета уплотнения глинистых пород тела и основания гидроотвалов вносятся с использованием зависимостей, вытекающих из теории нелинейной фильтрационной консолидации [29]. При этом все дополнения направлены на уточнение лишь значений коэффициента консолидации, которые и подставляются в формулы или графики для расчета осадок и порового давления, основанные на теории линейной фильтрационной консолидации.

Рассмотрим порядок определения параметров нелинейной консолидации с использованием результатов компрессионно-фильтрационных испытаний глинисто-меловых пород линз, сформировавшихся в теле северной песчаной упорной призмы гидроотвала "Березовый Лог" при одностороннем намыве, и гумусированных суглинков основания. Характеристики начального состояния (до приложения нагрузки) пород основания и тела упорной призмы приведены в табл. 10.

Анализ полученных экспериментальным путем зависимостей от порового давления и относительной осадки от времени t показал, что около 90 % осадки глинисто-меловых паст приходится на период фильтрационной консолидации (до достижения поровым давлением нулевого значения). Испытания образцов пастообразных пород в условиях закрытой системы показали, что для этих пород отношение максимальной величины порового давления к осевой нагрузке близко к единице. Аналогичные результаты получены для меловых паст гидроотвала "Симонова пасека".

При обработке компрессионных зависимостей с учетом нелинейной консолидации вводилась функция ψ' , характеризующая изменение пористости:

$$\psi' = \frac{\epsilon - \epsilon_K}{\epsilon_0 - \epsilon_K},$$

где ϵ_0, ϵ_k — коэффициент пористости соответственно начальный и конечный, отвечающий предельно плотному состоянию грунта.

Компрессионная зависимость для широкого диапазона уплотняющих давлений:

$$\psi' = \exp(-\alpha_1 P_{эф}),$$

где $P_{эф}$ — эффективное давление; α_1 — параметр компрессионной кривой; q — внешнее давление; P_n — избыточное поровое давление.

Коэффициент фильтрации K_f как величина переменная, зависящая от изменения пористости, представлялся в виде

$$K_f = K_f^0 \psi^n,$$

где K_f^0 — начальный коэффициент фильтрации, соответствующий коэффициенту пористости ϵ_0 ; n — параметр.

Из решения задачи нелинейной фильтрационной консолидации вытекает, что коэффициент консолидации C_v может быть приближенно принят в виде (по Ю.К. Зарещкому):

$$C_v = C_v^0 \exp(-\lambda' q), \quad (IV.1)$$

где при $q < 0,1$ МПа

$$\lambda' = \frac{(n-1)\alpha}{2},$$

при $q \geq 0,1$ МПа

$$\lambda' = \frac{(n-1)\alpha_1}{2,5},$$

C_v^0 — начальный коэффициент консолидации (при $q = 0$).

Для значительной части ($> 90\%$) периода консолидации можно использовать для расчета уплотнения формулы и графики линейной теории фильтрационной консолидации, вводя в них коэффициент консолидации в соответствии с соотношением (IV.1).

На рис. 23 показано изменение пористости и водопроницаемости гумусированных суглинков основания и глинисто-меловых паст от уплотнения, полученное при обработке исходных данных о сжимаемости и величине коэффициентов фильтрации в диапазонах давления 0–1,1 (гумусированные суглинки) и 0–1,5 МПа (пастообразные грунты).

Из зависимостей $\ln \psi' = f(P_{эф})$ и $\ln(K_f/K_f^0) = \varphi(-\ln \psi')$ для гумусированных суглинков получаем угловые коэффициенты прямых (параметры): $\alpha_1 = 0,21$ и $n = 1,86$. Тогда параметр

$$\lambda' = \frac{\alpha_1 (n-1)}{2,5} = 0,077.$$

Для пастообразных намывных грунтов параметры, полученные по той же методике: $\alpha_1 = 0,18$; $n = 2,12$ и $\lambda' = 0,08$.

Для определения параметров λ' и C_v^0 используются также результаты

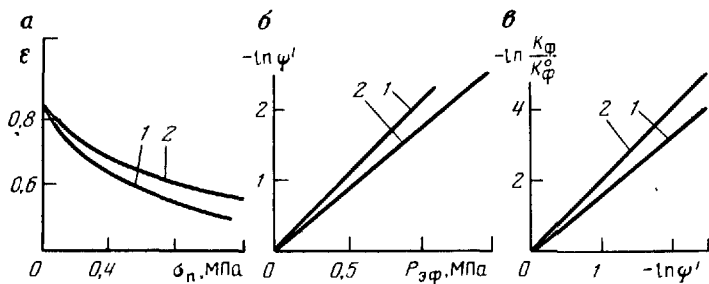


Рис. 23. Зависимости к определению параметров нелинейной консолидации гумусированных суглинков основания (1) и глинисто-меловых грунтов (2) гидроотвала "Березовый Лог":

ϵ от σ_n (а); $\ln \psi'$ от $P_{эф}$ (б); $\ln (K_{ф}/K_{ф}^0)$ от $\ln \psi'$ (в)

лабораторных исследований консолидации, проводившихся в универсальных стабилометрах с замером порового давления в нижних торцах образцов. Определяется продолжительность процесса консолидации, т. е. время, за которое избыточное поровое давление на нижнем торце ($K_1 = 1$) полностью рассеивается ($P_n = 0$) или стабилизируется осадка [$S(t)/S_{\infty} = 1$]. Из графиков функций $F(K_1, m) = P_n/P_n^0$ и $F(m) = S(t)/S_{\infty}$ следует, что процесс фильтрационной консолидации под действием постоянной нагрузки завершается при $m = 5,4$ (рис. 14). При различных внешних нагрузках определяется продолжительность периодов консолидации t_k и затем вычисляются значения коэффициента консолидации в виде $C_v = 4mh/\pi^2 t_k$. Здесь высота образца h равна длине пути фильтрации (образцы дренируются на верхних торцах).

Полученные различными способами значения C_v ($m^2/сут$) пастообразных пород при внешнем давлении 0,4; 0,6; 0,8 МПа использованы при построении графиков зависимостей $\ln C_v = f(q)$ и определении из них значений C_v^0 и λ' .

Сопоставление полученных различными способами значений C_v показало, что использование для определения коэффициента консолидации формулы $C_v = f(K_{ф}, \epsilon_{ср}, a)$ приводит к существенному занижению сроков уплотнения породных масс и получению недопустимо "оптимистических" результатов. Указанное положение объясняется низкой точностью лабораторного определения коэффициентов фильтрации глинистых грунтов (возможны ошибки на порядок и более), а также спрямлением компрессионной зависимости (при вычислении a и $\epsilon_{ср}$ для весьма значительного диапазона уплотняющего давления 0–0,8 МПа. Преимуществом обработки экспериментальных данных по формулам Ю.К. Зарещкого [29] является учет нелинейного характера зависимости $\epsilon = f(q)$ и использование отношений $K_{ф}(q)/K_{ф}^0$ (а не абсолютных величин).

Предложенный способ получения зависимости $C_v(q)$ по данным опытов на консолидацию является наиболее простым и надежным, так как

он позволяет определять одновременно параметры C_v и λ' без нахождения K_{ϕ} .

С учетом вышеизложенного соотношение для определения значений C_v ($\text{м}^2/\text{сут}$) имеет вид:

$$C_v = 2,189h^2/t_k,$$

где h — высота образца, м; t_k — продолжительность периода уплотнения образца действующим давлением, сут.

Для различных зон гидроотвала "Березовый Лог" при лабораторных исследованиях процессов консолидации глинисто-меловых намывных масс с использованием описанного способа получены следующие зависимости C_v ($\text{м}^2/\text{сут}$) от q ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$):

для грунтов-линз в упорной призме

$$C_v = 0,11 \exp(-0,08q);$$

для первой секции

$$C_v = 0,13 \exp(-0,10q);$$

для второй секции

$$C_v = 0,085 \exp(-0,14q);$$

для третьей секции

$$C_v = 0,078 \exp(-0,173q).$$

Для меловых паст гидроотвала "Симонова пасека" (Стойленский карьер КМА) получено соотношение

$$C_v = 0,12 \exp(-0,09q).$$

Обработка результатов, полученных при испытаниях на консолидацию образцов из гидроотвалов "Бековского", "Свободного" и "Новобачатского" (Кузбасс), состоявшая в установлении расчетных значений C_v при различном уплотняющем давлении и построении графиков $\ln C_v - q$, позволила получить следующие обобщенные зависимости $C_v(q)$:

для пляжных зон

$$C_v = 3,4 \cdot 10^{-2} \exp(-0,055q);$$

для ядерных зон

$$C_v = 2,9 \cdot 10^{-2} \exp(-0,08q).$$

Расчетные значения влажности, плотности, плотности минеральных частиц, а также гранулометрический состав намывных грунтов приводятся ниже при освещении вопросов инженерно-геологического районирования гидроотвальных массивов.

Определение C_v по полному периоду стабилизации осадки допустимо при выполнении ориентировочных прогнозных расчетов.

Сроки стабилизации осадок намывных массивов и сложенных сильно-сжимаемыми грунтами оснований могут уточняться с использованием решений одномерных задач уплотнения квазидвухфазных грунтов, учитывающих ползучесть минерального скелета и сжимаемость поровой жид-

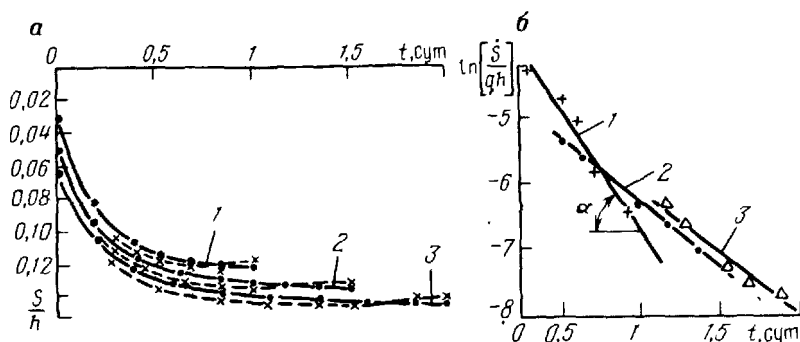


Рис. 24. Зависимости S/h (а) и $\ln(\dot{S}/qh)$ (б) от времени (сплошные – экспериментальные, пунктирные – расчетные кривые) при уплотняющих давлениях (МПа) 0,4 (1), 0,6 (2) и 0,8 (3) для глинисто-меловых намывных грунтов

кости. Исходные параметры к аналитическим зависимостям $P_{и} = f_1(t)$ и $S = f_2(t)$ определялись по кривым консолидации намывных глинисто-меловых (Лебединский карьер КМА) и глинистых грунтов (Михайловский карьер КМА) с использованием методики МГИ для определения коэффициента консолидации C_v через продолжительность периода рассеивания порового давления $P_{и}$ и методики НИИОСП [18] для определения параметров $a_{0перв}$, $a_{0вт}$, δ , δ_1 . На рис. 24, 25 показаны исходные экспериментальные зависимости (а) относительных осадок $S/h = f(t)$, полученные при испытаниях на универсальных стабилометрах М-2 конструкции МИИТ, и их обработка (б) для определения параметра ползучести δ_1 при значениях уплотняющего давления $q = 0,2; 0,4; 0,8$ МПа.

Относительная осадка представлялась в виде:

$$\frac{S(t_K)}{h} = q(a_{0перв}U_{перв} + a_{0вт}U_{вт}), \quad (IV.2)$$

$$\frac{S(t_K)}{qh} = a_0 = a_{0перв} + a_{0вт}[1 - \exp(-\delta_1 t)]. \quad (IV.3)$$

Общий и первичный (до достижения $P_{и} = 0$) коэффициенты сжимаемости определяются из графиков $S/h = f(t)$, коэффициент сжимаемости $a_{0вт}$ на период вторичной консолидации) – из формулы (IV.3). Параметр δ определяется по формуле

$$\delta = \delta_1 a_{0вт} / a_{0перв}.$$

Значения параметров сжимаемости представлены в табл. 11. На рис. 24, 25 показаны пунктиром теоретические зависимости $S/h = f(t)$, полученные с использованием установленных параметров.

На рис. 26 представлены экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (пунктирные линии) графики $P_{и} = f(t)$ при различных значениях уплотняющего давления.

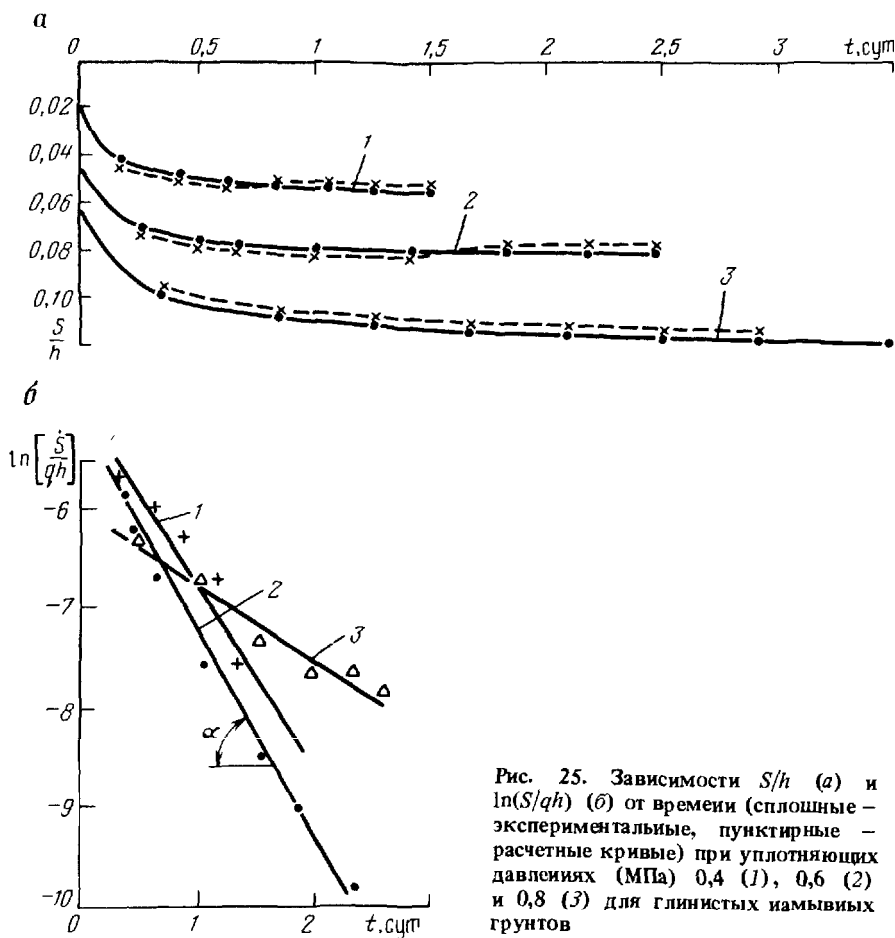


Рис. 25. Зависимости S/h (а) и $\ln(S/qh)$ (б) от времени (сплошные — экспериментальные, пунктирные — расчетные кривые) при уплотняющих давлениях (МПа) 0,4 (1), 0,6 (2) и 0,8 (3) для глинистых иамывиных грунтов

Таблица 11

Грунт	q , МПа	a_0 , 1/МПа	$a_{0перв}$, 1/МПа	$a_{0вт}$, 1/МПа	δ , 1/сут	δ_1 , 1/сут	C_v , м ² /сут
Глинистая паста (МГОК)	0,4	0,3125	0,275	0,0391	0,727	5,112	0,0177
	0,6	0,233	0,2158	0,0205	0,208	2,192	0,0106
	0,8	0,1875	0,1738	0,0151	0,178	2,049	0,0079
Глинисто-меловая паста (ЛГОК)	0,4	0,14	0,11	0,0327	0,555	1,866	0,0397
	0,6	0,136	0,118	0,0185	0,332	2,126	0,0265
	0,8	0,15	0,125	0,0277	0,163	0,733	0,0199
Темно-бурые суг- линки (основание отвала, МГОК)	0,2	0,311	0,258	0,0538	1,125	5,401	0,0794
	0,4	0,262	0,2095	0,0554	0,654	2,473	0,0397

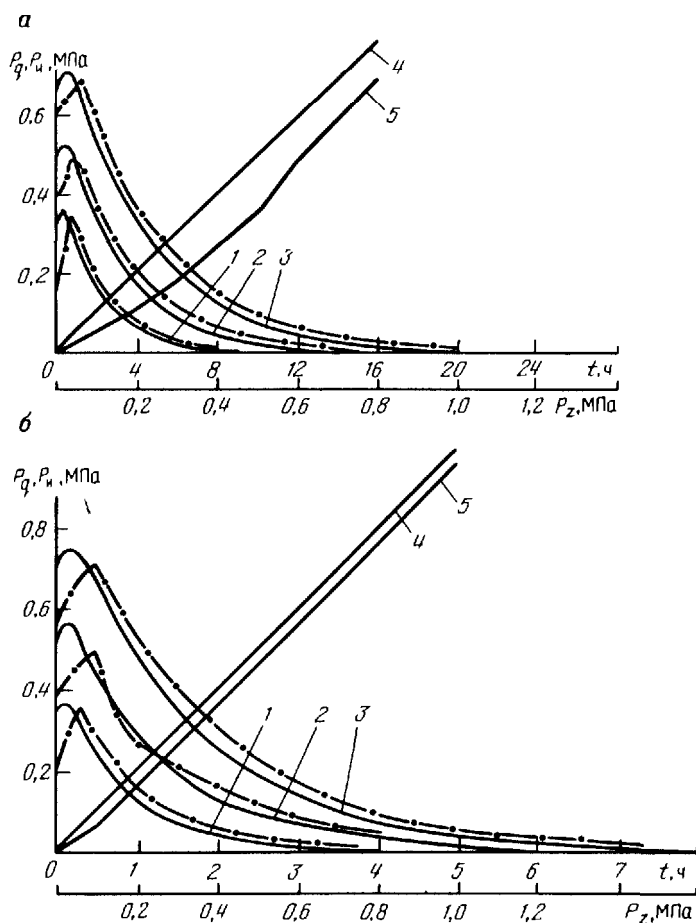


Рис. 26. Зависимости порового давления P_u от времени (линии сплошные — экспериментальные, пунктирные — расчетные кривые) при уплотняющих давлениях (МПа) 0,4 (1), 0,6 (2), 0,8 (3), зависимости от осевого давления P_z , бокового распора P_q (4) и порового давления P_u (5) в условиях закрытой системы: а — для глинистых намывных грунтов (МГОК); б — для глинисто-меловых грунтов (ЛГОК)

Таким образом, выполнение обратных расчетов позволило установить правомерность применения рассмотренных аналитических решений.

Использование обратных задач рассматривается как универсальный метод определения консолидационных параметров также в работе [30], где приводятся результаты обработки экспериментальных исследований уплотнения семи литологических типов слабых грунтов с ненарушенной и нарушенной структурой. Показатели водно-физических свойств этих грунтов даны в табл. 12. В образцах представлены следующие типы грун-

Таблица 12

Литологический тип грунта	Содержание органического вещества W_o , %	Влажность W , %	Плотность ρ , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Плотность частиц грунта Δ , г/см ³	Пористость ϵ , %	Коэффициент пористости e , %	Степень влажности S , %	Предел текучести W_p , %	Предел раскаты W_L , %	Число пластинистости M_p , %
1	-	1480	0,99	0,86	1,55	96,13	24,83	1,00	-	-	-
2	55,14	800	1,00	0,11	1,80	93,88	15,36	0,94	-	-	-
3	19,5	87,6	1,37	0,73	2,27	67,94	2,11	0,94	118	94	24
4	-	94,8	1,42	0,73	2,66	72,56	2,64	0,95	94,8	59,6	35,2
4	-	84,9	1,52	0,82	-	69,32	2,26	1,00	-	-	-
5	-	40,3	1,72	1,23	2,63	53,23	1,138	0,93	40,3	31,3	9,0
6	0,31	34,23	1,74	1,40	2,67	47,8	0,914	0,99	31	20	11
7	6,5	44,79	1,69	1,22	2,69	54,65	1,205	1,00	-	-	-
7	-	43,16	1,77	1,24	-	53,72	1,161	1,00	-	-	-

Таблица 13

Литологический тип грунта	Высота образца h , см	q , МПа	Коэффициент консолидации C_v , см ² /мин	Коэффициент пористой сжимаемости $\phi_{порев}$, 1/МПа	Коэффициент, учитывающий сжимаемость поровой воды, B	Параметры экспансионного ядра популесты	
						δ_1 , 1/мин	δ_2 , 1/мин
1	20,0	0,05	43,121	8,92	0,681	$0,230 \cdot 10^{-4}$	$0,361 \cdot 10^{-4}$
2	20,0	0,025	0,196	12,55	0,4484	$0,520 \cdot 10^{-4}$	$0,199 \cdot 10^{-4}$
3	22,7	0,15	1,759	0,614	0,1822	$0,211 \cdot 10^{-3}$	$0,482 \cdot 10^{-4}$
4	25,2	0,025	2,353	2,529	0,9602	$0,147 \cdot 10^{-3}$	$0,136 \cdot 10^{-4}$
4	22,6	0,10	0,480	0,031	0,6903	$0,101 \cdot 10^{-2}$	$0,574 \cdot 10^{-3}$
5	24,6	0,05	11,159	1,111	0,93487	$0,702 \cdot 10^{-2}$	$0,341 \cdot 10^{-4}$
6	24,1	0,025	34,042	0,350	0,914	$0,759 \cdot 10^{-2}$	$0,290 \cdot 10^{-2}$
7	30,0	0,025	57,856	0,216	0,586	$0,303 \cdot 10^{-2}$	$0,135 \cdot 10^{-2}$
7	29,4	0,125	3,198	0,251	0,722	$0,165 \cdot 10^{-2}$	$0,725 \cdot 10^{-3}$

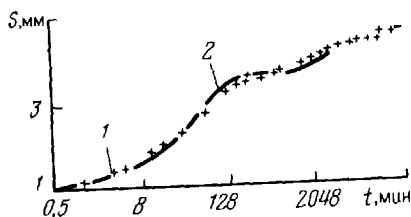


Рис. 27. Зависимость осадки S от времени t для заторфованного суглинка (1 — экспериментальные данные, 2 — расчетная кривая)

тов (табл. 12, 13): 1 — сфагновый фуксум-торф, степень разложения $R = 0,5$; 2 — органический сапропель; 3 — суглинок гумусированный; 4 — гумбрин (паста); 5 — каолинит (паста); 6 — суглинок покровный (среднее Приобье); 7 — суглинок гумусированный. Обратные расчеты выполнялись для модели грунта, предложенной З.Г. Тер-Мартirosяном [14]. Результаты расчетов, проведенных на ЕС ЭВМ по программному комплексу ГЕОПАК-80, представлены в табл. 13. Достоверность полученных параметров подтверждается сравнением экспериментальной и расчетной кривых консолидации для заторфованного суглинка, слагающего основание жилого дома микрорайона "Мещерское озеро" в г. Горьком (рис. 27). Расчетная кривая построена для следующих значений консолидационных параметров: $C_v = 1,155 \text{ мм}^2/\text{мин}$; $m_c = 0,929 \text{ 1/МПа}$; $B = 0,749$; $\delta_1 = 0,153 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мин}$; $\delta = 0,483 \cdot 10^{-4} \text{ 1/мин}$; $S_{\text{кон}} = 4,517 \text{ мм}$.

При определении сопротивления сдвигу тонкодисперсных намывных масс на универсальных стабилометрах разрушение образцов с начальными влажностью и плотностью, близкими к естественным, производилось в условиях закрытой системы (неконсолидированно-недренированные испытания) и при консолидированно-недренированных испытаниях, в ходе которых грунт сначала уплотнялся до полной стабилизации под приложенной нагрузкой и затем доводился до разрушения при быстром снижении бокового давления в рабочей камере прибора. Характеристики сопротивления сдвигу грунтов гидроотвалов ГМА и Кузбасса, полученные в лабораторных условиях для консолидированных ($U = 1$, $C = C_k$, $\varphi = \varphi_k$) и неконсолидированных образцов ($U = 1$, $C = C_3$, $\varphi = \varphi_k$), приведены в табл. 14. При определении φ и C вертикальное давление изменялось в диапазоне 0,2–0,4–0,8 МПа.

Минеральный состав и микростроение намывных масс изучали преимущественно для техногенных отложений гидроотвалов разрезов Кузбасса в лаборатории кафедры грунтоведения и инженерной геологии МГУ [31]. Минеральный состав определяли только для глинистой фракции (размер $< 0,001 \text{ мм}$) с помощью рентгеновского метода. Установлено, что преобладающие в ядерной зоне частицы имеют следующий состав (%): хлорит — 7,5–10, каолинит — 7,5–10, смешанослойные — 30–45, гидрослюда — 40–50. Исследования микростроения гидроотвальных масс производили на высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе с гарантийным разрешением 60 Å. У каждого образца исследовали две поверхности: перпендикулярную и параллельную напластованию намывных масс. Электронно-микроскопическое изучение намывных масс

Таблица 14

Гидроотвал, зона	Степень уплотнения			
	0		1	
	φ_3 , градус	C_3 , МПа	φ_K , градус	C_K , МПа
"Березовый Лог": вторая секция (ядро) глинисто-меловые лин- зы в песчаной упорной призме (пляжная зона) первая секция (проме- жуточная зона)	6	0,01	15	0,035
	5	0,05	16	0,025
	4	0,01	18	0,03
"Симонова пасека": пляж ядро	7	0,015	20	0,02
	5	0,01	16	0,04
"Бековский": пляж ядро	3	0,005	22	0,01
	3	0,01	16	0,015
"Свободный": пляж ядро	6	0,02	29	0,03
	4	0,016	23	0,0175
"Новобачатский": пляж ядро	7	0,015	20	0,010
	4	0,012	16	0,020
"Южный": ядро	3	0,005	20	0,015

позволило установить, что по мере удаления от фронта намыва их микро-структура изменяется от скелетной (приоткосная зона) через скелетно-ячеистую к ячеистой (прудковая зона). В вертикальном разрезе прудковой зоны мощностью до 30 м микроструктура изменяется от ячеистой через скелетно-матричную до ориентированной турбулентной.

Изменения микроструктуры намывных грунтов по мере удаления от фронта намыва хорошо согласуется с результатами гранулометрического анализа, физико-механическими свойствами, а также с общими теоретическими положениями о процессе седиментации полидисперсной суспензии.

Испытаниям на сдвиговую ползучесть на приборах плоскостного среза подвергались образцы намывных грунтов приоткосной (пляжной), проме-

Таблица 15

Зона гидроотвала	Показатели				
	Плотность частиц грунта Δ , г/см ³	Плотность γ , г/см ³	Влажность W , %	Начальный коэффициент пористости e_0	Коэффициент водонасыщения G
Пляжная	2,65	1,9	31,0	0,83	1,0
Промежуточная	2,7	1,9	32,5	0,88	1,0
Прудковая	2,75	1,88	34,9	0,97	1,0

жуточной и прудковой (ядерной) зон гидроотвала "Новобач.гский". Показатели водно-физических свойств намывных грунтов даны в табл. 15.

Испытания включали быстрые срезы образцов для определения условно-мгновенного сопротивления сдвигу τ_0 и срезы образцов при значениях касательного напряжения $\tau = (0,75 \div 0,9) \tau_0$. В ходе медленных срезов фиксировалась деформация сдвига u и строились кривые ползучести $u = f(t)$ при $\sigma_n = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$. Испытывали образцы грунтов при завершеном ($U = 1$) уплотнении.

Уравнение сопротивления сдвигу представлялось в виде

$$\tau = C(t) + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi,$$

где C_t — сцепление грунта как функция времени; φ — угол внутреннего трения.

Структурно-механические параметры длительной прочности T_p и C_∞ в выражении

$$C(t) = C_0 - (C_0 - C_\infty) \frac{t_p}{T_p + t_p}$$

определялись по спрямленному графику длительной прочности, построенному в координатах $t_p/C_0 - C(t) - t_p$. Предельно длительное сцепление слабоструктурных намывных грунтов $C_\infty = 0$. Параметры сдвиговой пол-

Таблица 16

Зона гидроотвала	Параметры				
	T_p , ч	C_0 , МПа	$\frac{1/\eta_r}{\text{МПа}} \cdot 10$	$\frac{1/\eta_p}{\text{МПа}} \cdot 10$	δ
Пляжная	1,26	0,02	5,16	30,08	1,0
Промежуточная	1,38	0,015	3,504	27,85	0,81
Прудковая	3,31	0,020	2,42	25,95	0,692

зучести η_t , η_{pi} δ [см. формулу (II.66)] определялись из приведенных к линейному виду выражений для скорости пластического $\dot{\epsilon}_t$ и прогрессирующего течения $\dot{\epsilon}_p$

$$\ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{t,p}}{\tau} \right) = \ln \left(\frac{1}{\eta_{t,p}} \right) + \delta \ln \tau.$$

Результаты обработки экспериментов представлены в табл. 16.

Структурно-механические параметры могут использоваться для контроля устойчивости сухих отвалов, размещенных на гидроотвалах. На основании полученных исходных данных определяются продолжительности периодов достижения разрушающих сдвиговых деформаций в тонкодисперсных грунтах гидроотвалов, что позволяет регламентировать режим отсыпки и конструкцию сухих отвалов на намывных основаниях.

IV.3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения надежной информации о механических свойствах грунтов в массиве следует выполнять натурные замеры порового давления, испытания методами вращательного среза и прессиометрическим, инструментальные наблюдения за осадками и деформациями сдвига тела и основания намывных сооружений.

На гидроотвале "Березовый Лог" измерялось поровое давление с помощью пьезодинамометров конструкции Гидропроекта, заложенных в намывных глинисто-меловых грунтах и основании песчаной упорной призмы. Замеры с применением стационарной системы контроля за поровым давлением были дополнены зондированием штанговыми пьезодинамометрами, выполнявшимся в комплексе с испытаниями методом вращательного среза. Гидростатическое взвешивание породных масс оценивалось с использованием данных замеров по пьезометрам, установленным в зонах закладки датчиков или зондирования. На гидроотвале "Березовый Лог" впервые внедрен комбинированный зонд МГИ, использование которого позволяет вдвое сократить объем буровых работ за счет совмещения датчика порового давления — штангового пьезодинамометра с поворотной крыльчаткой (прибором лопастного среза).

Рассмотрим результаты натурных исследований намывных масс для участка упорной призмы и трех секций массива гидроотвала "Березовый Лог", разделяемых в настоящее время дренажными призмами. На рис. 28 представлен план гидроотвала, где показаны точки закладки стационарных датчиков для замера порового давления, инженерно-геологические скважины, точки зондирования и размещения пьезометров. Проходка инженерно-геологических скважин выполнялась Гидропроектом, ВИОГЕМОм, НИИКМА при участии кафедры геологии МГИ. На карте фактического материала показаны основные инженерно-геологические скважины, которые использовались при интерпретации данных зондирования и расчетах уплотнения намывного массива. Буровые работы во внутренних зонах гидроотвала проводились в зимний период (со льда).

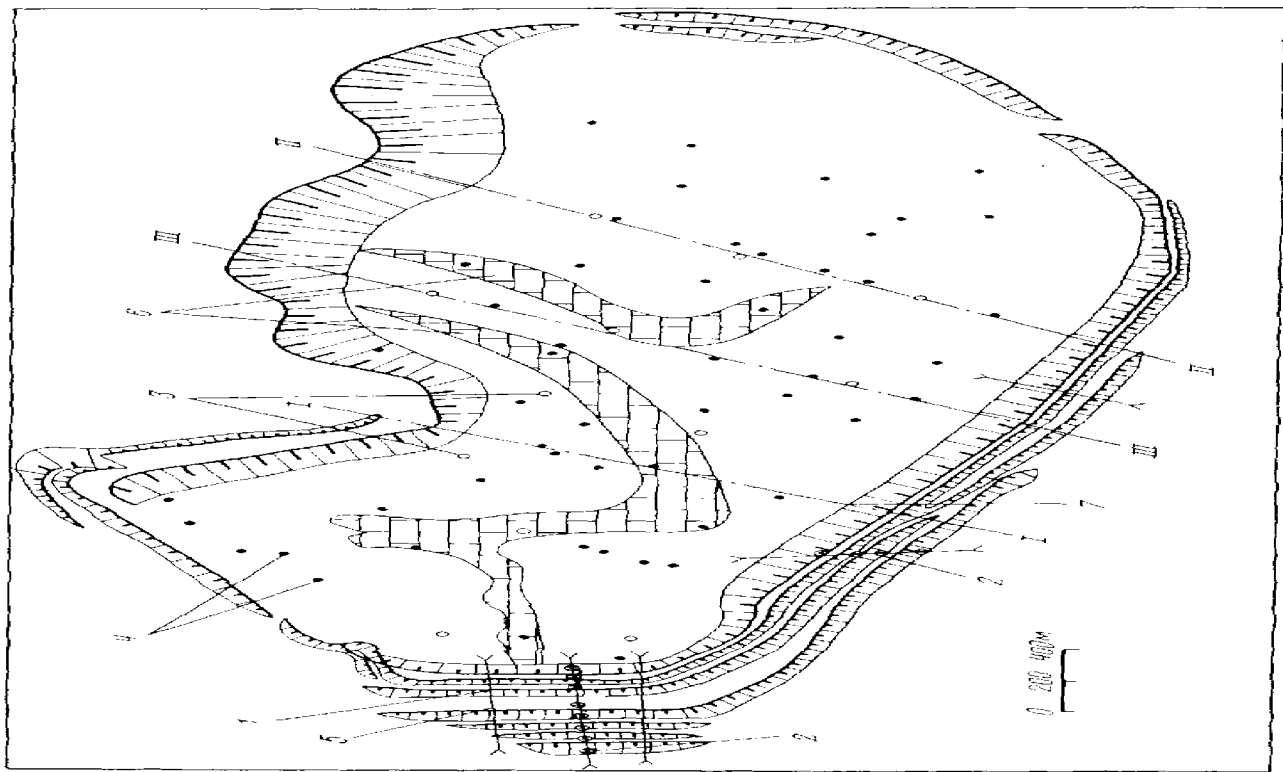


Рис. 28. Карта фактического материала гидроотвала "Березовый Лог":

1 — откосные сооружения; 2 — точки закладки стационарных датчиков порового давления; 3 — инженерно-геологические скважины; 4 — точки зондирования; 5 — пьезометрические профили; 6 — выходы коренных мелов в ложе гидроотвала; 7 — линии инженерно-геологических разрезов (продольные оси разделительных дренажных призм)

Зондирование проводилось кафедрой геологии МГИ совместно с буровыми бригадами перечисленных организаций. Результаты зондирования отражались на инженерно-геологических разрезах гидроотвала, один из которых показан на рис. 29. Линии I—I и II—II (см. рис. 28) приурочены к границам между секциями гидроотвала, линия III—III совпадает с продольной осью третьей дренажной призмы.

Проанализируем данные замеров порового давления в глинисто-меловых линзах и основании северной упорной призмы. С целью надежной интерпретации данных натурных замеров порового давления следует осуществлять дифференцированный подход к измеряемым величинам. При этом необходимо различать общее давление воды в порах P_w и избыточное поровое давление

$$P_{\text{и}} = P_w - P_{w1}, \quad (\text{IV.4})$$

где P_{w1} — гидростатическое давление, по отношению к которому производится отсчет.

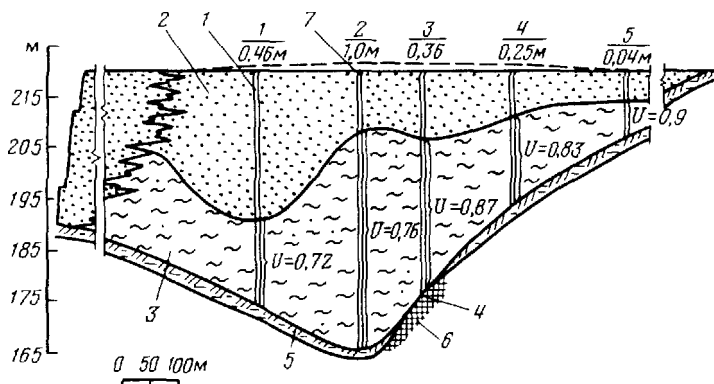


Рис. 29. Инженерно-геологический разрез гидроотвала "Березовый Лог" по линии I—I:

1 — инженерно-геологическая скважина и ее номер; 2 — песок намывной, мелко- и среднезернистый, местами с обломками мела и прослоями глинисто-меловых паст; 3 — суглинисто-меловая паста с прослоями песка и суглинка; 4 — щебень, древесная галька плохо окатанности, мел с суглинистым заполнителем; 5 — почвенно-растительный слой — суглинок покровный; 6 — мел белый, слабый, трещиноватый, по трещинам ожеженный; 7 — осадка намывного слоя и ее величина, м

Учитывая подтопление глинистых слоев тела и основания упорной призмы гидроотвала "Березовый Лог", общее давление в поровой воде представляем в виде:

$$P_w = P_0 + P_H + P_{и1} + P_{и2}, \quad (IV.5)$$

где P_0 — давление, обусловленное собственной массой воды, заполняющей поры породы в глинистом слое; P_H — давление в поровой воде, обусловленное наличием напора (столба воды) на верхней границе слоя; $P_{и1}$ — избыточное поровое давление, возникающее под действием собственной массы пород слоя (для намывных слоев); $P_{и2}$ — избыточное поровое давление, обусловленное давлением вышележащей намывной толщи.

Полученные для глинисто-меловых линз северной песчаной упорной призмы и суглинков ее основания данные показывают, что фиксируемое датчиками давление P_w примерно равно сумме P_0 и P_H , а значения $P_{и1}$ (для намывного слоя глинисто-меловых пород) и $P_{и2}$ (для намывного слоя и основания) близки к нулю. В зоне замеров основание мощностью 8 м перекрыто намывным слоем меловых пород мощностью около 3 м, наличие которого замедляет уплотнение пород основания. Формирование слоя глинисто-меловых пород, где закладывались датчики, завершено через три года после начала намыва гидроотвала.

После пригрузки низового откоса северо-западного участка упорной призмы путем намыва песчаной подушки мощностью от 7 до 14 м под ее действием уплотнялись слои намывных суглинков (4–6 м) и суглинков основания (6–8 м). Через две недели после прекращения намыва песчаной пригрузки в этих слоях были заложены пьезодинамометры и зафиксировано избыточное поровое давление ($P_{и2}$). Степень уплотнения намывных суглинков и глинистых пород основания через 3 мес после приложения внешней нагрузки составляла $U = 0,6–0,8$.

Стационарные наблюдения и зондирование позволили установить, что захватываемые призмой возможного оползания слои намывных глинисто-меловых грунтов в теле и суглинков в основании песчаной дамбы гидроотвала практически полностью уплотнились ($U \approx 1$) под действующими нагрузками. Скорость рассеивания избыточного порового давления в этих слоях примерно соответствовала скорости намыва ($v_H \leq 8$ м/год). Полученные с использованием метода вращательного среза характеристики сопротивления пород сдвигу близки к показателям, установленным при консолидированно-недренированных испытаниях образцов на стабилометрах М-2 и УСВ-2 (см. табл. 14).

Наиболее полно удалось изучить процесс уплотнения грунтов тела и основания гидроотвала в зоне усиления низового откоса западной упорной призмы. Через три месяца после намыва песчаной подушки в зонах закладки стационарных датчиков было проведено комплексное зондирование пригруженных глинисто-меловых слоев и глинистых грунтов основания.

Натурные замеры порового давления позволили уточнить значения коэффициентов консолидации тонкодисперсных грунтов по методике, 100

изложенной выше, применительно к лабораторным исследованиям уплотнения образцов под действием постоянных нагрузок. Использование решения задачи уплотнения слоя при $q = \text{const}$ для интерпретации результатов натурных исследований на участке усиления низового откоса упорной призмы является вполне допустимым, так как намыв здесь осуществлен в очень короткий срок (несколько суток). Степень уплотнения слоев определяли как отношение площадей эпюр эффективных и тотальных напряжений [см. формулу (11.25)]. По величине степени уплотнения U с помощью графика функции $U = f(m)$ определяли параметр m и затем вычисляли коэффициенты консолидации:

$$C_v = 4m d^2 / \pi^2 t,$$

где d — длина пути фильтрации в слое; t — продолжительность периода между моментами окончания намыва и замеров порового давления. С учетом величины уплотняющего давления получены следующие уточненные зависимости:

для намывных глинисто-меловых пород на участке упорной призмы

$$C_v = 0,09 \exp(-0,11 q),$$

для глинистых пород основания (интегральный показатель слоистой толщи)

$$C_v = 0,2 \exp(-0,072 q),$$

где q измеряется в МПа $\cdot 10^{-1}$.

Расхождение полученных по натурным ($C_v^0 = 0,2 \text{ м}^2/\text{сут}$) и лабораторным ($C_v = 0,08 \text{ м}^2/\text{сут}$) данным значений начального (при $q = 0$) коэффициента консолидации объясняется тем, что для натурных условий определена интегральная характеристика слоистой толщи, представленной черноземом, гумусированными суглинками, супесями. Лабораторные испытания проводились на образцах лишь одной литологической разности — гумусированных суглинков.

Установленные с помощью зондирования характеристики уплотняемости во времени использованы для расчетов значений избыточного порового давления в точках закладки стационарных пьезодинамометров (зона усиления низового откоса, северо-западный участок упорной призмы). Натурные замеры $P_{\text{и}}$ выполнялись в течение двух лет. Расчеты $P_{\text{и}}$ производили по графику $F_9(k_1, m) - P_{\text{и}}(t)/q$ (см. рис. 14, а). Расхождения расчетных и измеренных значений $P_{\text{и}}$ не превышали 15 %. Значения $C_v(q)$ определяли по приведенным выше зависимостям.

Полученная с помощью зондирования зависимость $C_v(q)$ для глинистых пород основания использована также при расчетах уплотнения основания песчаной упорной призмы на начальный период формирования гидроотвала "Березовый Лог", где НИИКМА производились инструментальные замеры осадок по специальным глубинным маркам. Основание уплотнялось под действием давления q от намывного песка, возраставшего в период наблюдений (до 17 мес) от 0 до 0,3 МПа. На рис. 30 показаны расположение измерительных точек в профиле и графики (натурные и

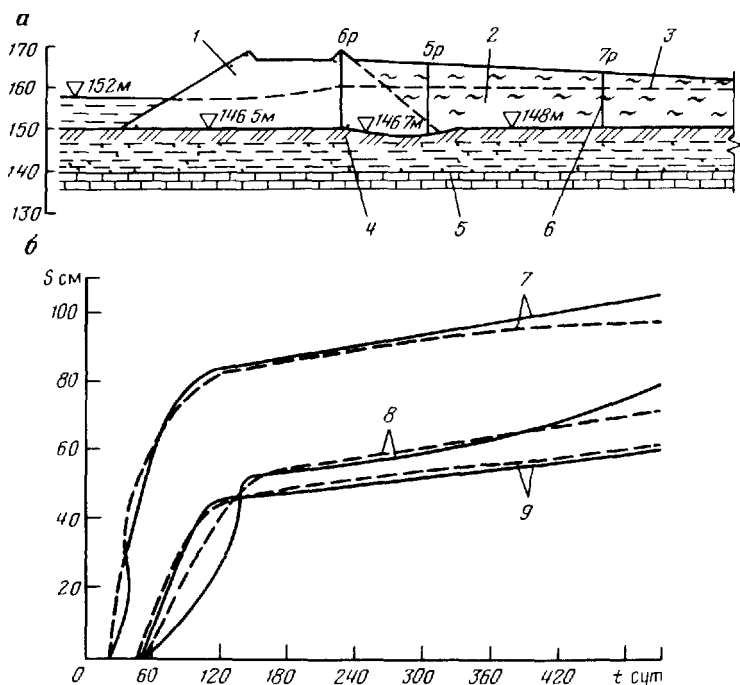


Рис. 30. Замеры осадок основания упорной призмы (по данным НИИКМА)

a — профиль участка замеров (1 — песчаная упорная призма, 2 — глинисто меловые намывные грунты, 3 — депрессионная кривая, 4 — суглинки основания, 5 — коренной мел, 6 — реперы) *б* — зависимости осадок S от времени t (сплошные и пунктирные линии соответственно по натурным данным и расчетные для реперов 6р (7), 7р (8), 5р (9))

расчетные) развития осадок во времени для трех наиболее "долговечных" реперов. Внешняя нагрузка на момент окончания замеров определялась с учетом положения депрессионной кривой

Осадки рассчитывали для случаев уплотнения под действием постепенно возрастающей нагрузки (см. рис. 13, б) слоев с двусторонним дренажем для точек 5, 6 (вверху — песок, внизу — трещиноватый мел, т. е. $h = 2d$) и односторонним дренажем для точки 7 (основание перекрыто намывными глинисто-меловыми породами, т. е. $h = d$). Значения коэффициента сжимаемости a и среднего коэффициента пористости $\epsilon_{ср}$ определяли по компрессионной кривой

Анализ результатов инструментальных наблюдений показал, что уже на первой стадии строительства гидроотвала средняя для восьми точек установки реперов степень уплотнения сложенного сильносжимаемыми породами основания составляла около 0,7. Точность расчетов повышается на 3–5 % при дифференцировании значений S_v и $\epsilon_{ср}$ для отдельных сезонов намыва и периодов "отдыха". Однако при определении интегрального

показателя уплотненности слоя, его осадки, искусственное снижение скорости намыва за счет периодов "отдыха" приводит к существенному упрощению расчетов при незначительном изменении конечных результатов. Поэтому в проектной практике для возрастающего во времени давления q (до 0,3 МПа) допустимо не учитывать перерывов в намыве, если коэффициент консолидации $C_v = f(q_{ср})$, где $q_{ср} = q/2$.

Полученные по результатам вращательных срезов обобщенные показатели сопротивления сдвигу глинисто-меловых намывных масс на участке упорной призмы при $U = 1$ составляют $\varphi = 16^\circ$, $C_K = 0,04$ МПа.

Зондирование тонкодисперсных намывных масс ядерной зоны со льда выполнялось с применением комбинированного зонда МГИ на участках с различными условиями дренирования намывной толщи.

В пределах первой секции (ближайшей к стационарным пульповодам) на северной упорной призме зондировалась толща мощностью свыше 50 м. Замеры штанговыми пьезодинамометрами не выявили наличия избыточного порового давления в намывном массиве и основании гидроотвала. Вид зависимости $C_v(q)$ для глинисто-меловых пород определялся с помощью графиков функции $U = f(\mu)$ при одностороннем и двустороннем дренировании слоев (см. рис. 9, 10). Значения коэффициента консолидации определялись при $U = 1$ по соотношению $C_v = h_n v_n / \mu$, где $\mu = 7,493 \cdot 10^{-2}$ (односторонний дренаж) и $\mu = 0,05$ (двусторонний дренаж). Для глинисто-меловых намывных масс в пределах первой секции получено:

$$C_v = 0,14 \exp(-0,07 q),$$

где C_v — интегральная характеристика слоистой толщи (включающей также мелкие прослои песка и меловую гальку); $q = \gamma' h/2$. Расчетные значения параметров сопротивления сдвигу глинисто-меловых намывных масс первой секции, полученные при обработке данных испытаний поворотной крыльчаткой, составили $\varphi = 18^\circ$, $C = 0,04$ МПа ($U = 1$). Вариация значений этих параметров по отношению к их средним величинам для краевых участков секции составляет около 20 %.

Натурные исследования в пределах второй и третьей секций гидроотвала выполнялись также с целью оценки влияния намывных дренажных элементов (призм и подушек) на форсирование консолидации глинисто-меловых грунтов. На рис. 29 представлен инженерно-геологический разрез гидроотвала по оси первой разделительной дренажной призмы (линия I—I на рис. 28). Разрез отражает состояние намывного массива на момент завершения шестнадцатого сезона работ. Для второй секции натурные замеры выявили наличие избыточного порового давления в намывных грунтах. Начальная степень уплотнения (до создания дренажной плавающей призмы) глинисто-меловых намывных слоев мощностью от 15 (дренаж односторонний) до 30 м (дренаж двусторонний — намывная толща располагается непосредственно на коренных мелах) изменялась в диапазоне $U_{нач} = 0,5-0,6$. По установленной натурными измерениями порового давления степени уплотнения слоев с двусторонним дренажем

определен следующий вид зависимости $C_p = f(q)$ для глинисто-меловых пород второй секции:

$$C = 0,08 \exp(-0,11q).$$

Полученное соотношение проверено при расчетах уплотнения слоев, намытых на водоупоре. Для расположенного на водоупоре слоя мощностью 15 м значения установленной расчетным путем и с помощью зондирования степени уплотнения для указанного слоя производились с использованием решений следующих задач (см. рис. 9, 11, 13):

а) уплотнение слоя под действием собственного веса в период намыва и после завершения формирования этого слоя;

б) уплотнение слоя под действием постепенно возрастающей нагрузки от вышележащей толщи намывных пород.

Полученные путем перестройки обобщенного графика $\tau = f(\sigma_n)$ в эффективных напряжениях (с учетом определенных при зондировании значений избыточного порового давления) расчетные параметры сопротивления сдвигу глинисто-меловых пород второй секции ядерной зоны составили: $\varphi = 16^\circ$, $C = 0,025$ МПа.

В период намыва дренажной призмы № 1 (см. рис. 29) в ядерной зоне состояние ее намывного основания контролировалось с помощью измерений порового давления по стационарным датчикам, зондирования штанговыми пьезодинамометрами и инструментальных наблюдений за осадками. Замеры осадок проводили по перпендикулярным к оси призмы створам. Вслед за интенсивными осадками песчаного конуса намыва при выдавливании глинисто-меловых масс развивались во времени осадки, обусловленные уплотнением тела призмы и ее намывного основания.

На начальном этапе возведения дренажной призмы глубина ее проникновения в глинисто-меловые грунты превышала половину мощности ядерной зоны. По мере продвижения призмы в центральную часть ядерной зоны вследствие сокращения путей фильтрации при внедрении песка в тонкодисперсные массы и увеличения их плотности под действием валов выпирания от конусов намыва глубина погружения дренажной призмы не превышала трети мощности ядерной зоны. Для измерительной точки № 1 (инженерно-геологическая скв. № 1 на разрезе по линии I—I) общая осадка слоя глинисто-меловых грунтов начальной мощностью 18 м за пятилетний период составила 1,19 м, в том числе 0,05 м за последний год. При этом степень уплотнения глинисто-мелового слоя закладки стационарных датчиков за пятилетний период возросла почти в три раза ($U_{нач} = 0,28$, $U_{80} = 0,8$). Влияние дренажной призмы на состояние тонкодисперсных намывных грунтов может быть проиллюстрировано результатами зондирования по скв. 2 и 3 (см. рис. 29). На рис. 31 сопоставляются эпюры тотальных напряжений и избыточного порового давления для глинисто-меловой толщи, размещаемой на водоупоре (скв. 2) и дренаже (скв. 3). Мощность песка в теле дренажной призмы и глинисто-меловых грунтов изменялась за двухгодичный период между моментами зондирования соответственно в следующих пределах: скв. 2—9,6—15,6 м; 43—40,5 м; скв. 3—8,8—15 м; 32,7—30 м. Из эпюр на рис. 31 следует, что

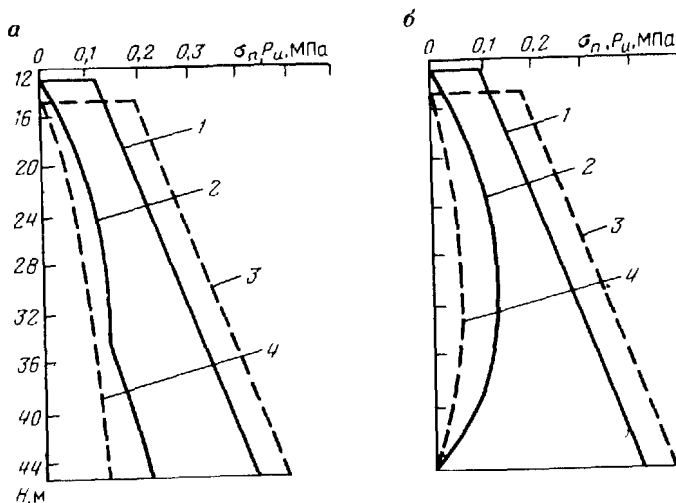


Рис. 31. Эпюры totalных напряжений σ_n (1, 3) и избыточного порового давления P_n (2, 4) от H глинисто-меловых грунтов на участке формирования песчаной дренажной призмы: а — намывная толща на водоупоре; б — намывная толща на дренаже

степень уплотнения толщи тонкодисперсных грунтов значительно увеличилась: на водоупоре $U_{77} = 0,53$, $U_{79} = 0,76$; на дренаже $U_{77} = 0,73$, $U_{79} = 0,87$.

При обработке данных стационарных замеров и зондирования учитывалось положение уровня воды в гидроотвале.

Зондирование намывного массива второй секции позволило уточнить место выходов коренных трещиноватых мелов (зоны с двусторонним дренажем намывной толщи) и определить пространственное положение отсечных призм, разделяющих секцию на рекультивационные карты. Установлена также необходимость создания третьей дренажной призмы, продольная ось которой совпадает с линией II—II (см. рис. 28).

Натурные исследования состояния тонкодисперсных грунтов третьей секции выполнялись на заключительном этапе формирования гидроотвала. В результате обработки результатов комплексного зондирования установлены характеристики сопротивления сдвигу консолидированных грунтов ($\varphi_k = 14^\circ$, $C_k = 0,018$ МПа) и определена зависимость для расчета коэффициента консолидации:

$$C_v = 0,06 \exp(-0,13 q).$$

Зондирование намывного основания второй дренажной призмы позволило получить исходные данные, необходимые для обоснования наращивания этой дренажной призмы с целью создания дополнительной емкости для складирования третьей секции гидроотвала отходов обогащения комбината "КМАруда".

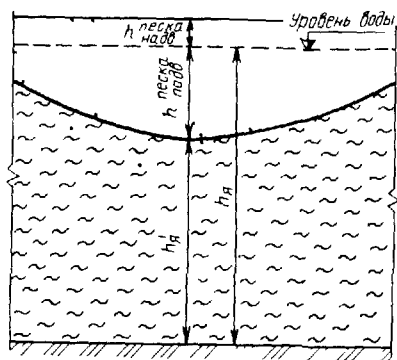


Рис. 32. Схема к расчету уплотнения намывных тонкодисперсных грунтов с учетом влияния дренажных призм

Общая степень уплотнения U_{Σ} намывного основания дренажной призмы № 2 определялась по принципу суперпозиции из решений следующих задач уплотнения

а) уплотнение слоя переменной мощности на водоупоре [$U=f(\mu)$],

б) "отдых" слоя мощностью $h_{я}$ под действием собственного веса слагающих его грунтов [$U=f(m_1)$],

в) уплотнение слоя мощностью $h'_{я}$ под действием постепенно вырастающей нагрузки от дренажной призмы [$Uf=(m_2)$],

г) "отдых" слоя мощностью h' под действием постоянной внешней

нагрузки от дренажной призмы после завершения ее формирования [$U=f(m'_1)$]

Коэффициент консолидации определялся по формуле $C_v(q)$ для следующих значений удельной нагрузки q

в период формирования ядерной зоны $C_{v1}=f(\gamma'h_{я}/2)$,

после создания дренажной призмы мощностью глинисто-меловых грунтов уменьшается от $h_{я}$ до $h'_{я}$ и $C_{v2}=f(q_{вн} + \gamma'h'_{я}/2)$, где $q_{вн}$ — удельная нагрузка от дренажной призмы (с учетом ее надводной и подводной частей)

Начальная степень уплотнения глинисто-меловой толщи определялась по графику $U=f(\mu)$, где $\mu = h_{я}v_n/C_{v1}$ (рис 9, б). После начала намыва дренажной призмы уплотнение под действием собственной массы q_c и внешней нагрузки $q_{вн}$ рассматривается для глинисто-мелового слоя мощностью $h'_{я}$ (рис. 32)

Зондирование центральной части третьей секции в первые два года после окончания укладки гидровскрыши показало, что здесь процесс седиментации минеральных частиц еще не завершился грунты обладали текучей консистенцией и их сопротивление вращательному срезу составило $\tau = 0,01-0,02$ МПа. В результате подачи фильтрующих материалов (песков и отходов рудообогатения) в эту секцию степень уплотнения тонкодисперсных грунтов значительно возросла и через три года при $h'_{я} = 20-25$ м составила $U_{\Sigma} = 0,7-0,8$ (начальные значения $U_{\Sigma} = 0,3-0,4$)

Таким образом, характеристики механических свойств для различных участков гидроотвала "Березовый Лог" в связи с существенным влиянием фракционирования устанавливались на основе поэтапного изучения намывных тонкодисперсных масс глинисто-мелового состава

Для гидроотвала "Симонова пасака" Стойленского карьера КМА по данным стационарных наблюдений за поровым давлением и зондирования

для пляжной и ядерной зон в пределах мелового намывного массива получены следующие характеристики уплотняемости их во времени:

$$C_v = 0,11 \exp(-0,07 q),$$

$$C_v = 0,08 \exp(-0,12 q).$$

Параметры сопротивления сдвигу для указанных зон:

1) $\varphi_K^H = 22^\circ$, $C_K^H = 0,025$ МПа; 2) $\varphi_K^H = 17^\circ$, $C_K^H = 0,03$ МПа.

Натурные исследования на гидроотвале карьера Лебединского ГОКа в балке Чуфичева выполнялись с целью определения показателей прочностных свойств глинистых грунтов основания дамбы гидроотвала, создания системы стационарного контроля устойчивости ее откосов и определения механических характеристик меловых намывных грунтов. Сильно- и среднесжимаемые грунты основания общей мощностью до 8 м представлены черноземом, гумусированными суглинками, супесями, ниже которых залегает крошковатый и трещиноватый коренной мел. Зондированием и стационарными замерами в глинистых грунтах основания избыточное поровое давление не зафиксировано. Отсутствие избыточного порового давления указывает на то, что при возведении дамбы на высоту до 32 м сжимаемые грунты основания успевали уплотняться при скорости намыва до 4 м/год. Характеристики сопротивления сдвигу глинистых грунтов оснований гидроотвалов в балках Березовый Лог и Чуфичева различаются незначительно (на 5–10 %). По результатам лабораторных (в стабилометрах УСВ-2) и натурных (методом вращательного среза) испытаний получены следующие обобщенные характеристики сопротивления сдвигу гумусированных суглинков:

а) $\varphi_3 = 5^\circ$, $C_3 = 0,015$ МПа ($U = 0$); б) $\varphi_K = 18^\circ$, $C_K = 0,03$ МПа ($U = 1$).

Состояние намывных меловых грунтов гидроотвала в балке Чуфичева изучалось с помощью комбинированного зонда МГИ. На рис. 33 дан план гидроотвала с точками стационарных наблюдений и комбинированного зондирования. На конец четвертого сезона работ установлены следующие значения степени уплотнения намывного массива: в пляжной зоне при мощности 20–15 м $U = 0,4 \div 0,5$; в ядерной (промежуточно-прудковой) зоне при мощности 15–10 м $U = 0,3 \div 0,4$. В шестом сезоне работ начато формирование первой песчаной дренажной призмы (см. рис. 33). Степень уплотнения меловых грунтов в основании этой призмы возросла за год примерно в 1,5 раза. Механические характеристики (C_v , φ , C) меловых намывных грунтов незначительно (на 10–15 %) отличаются от соответствующих показателей грунтов гидроотвала "Симонова пасека".

Для предварительной оценки состояния намывных масс гидроотвалов карьеров Семилукского огнеупорного завода был применен метод инженерно-геологических аналогий. С учетом структурной позиции и геологического строения Семилукской группы месторождений огнеупорных глин использованы характеристики тонкодисперсных масс гидроот-

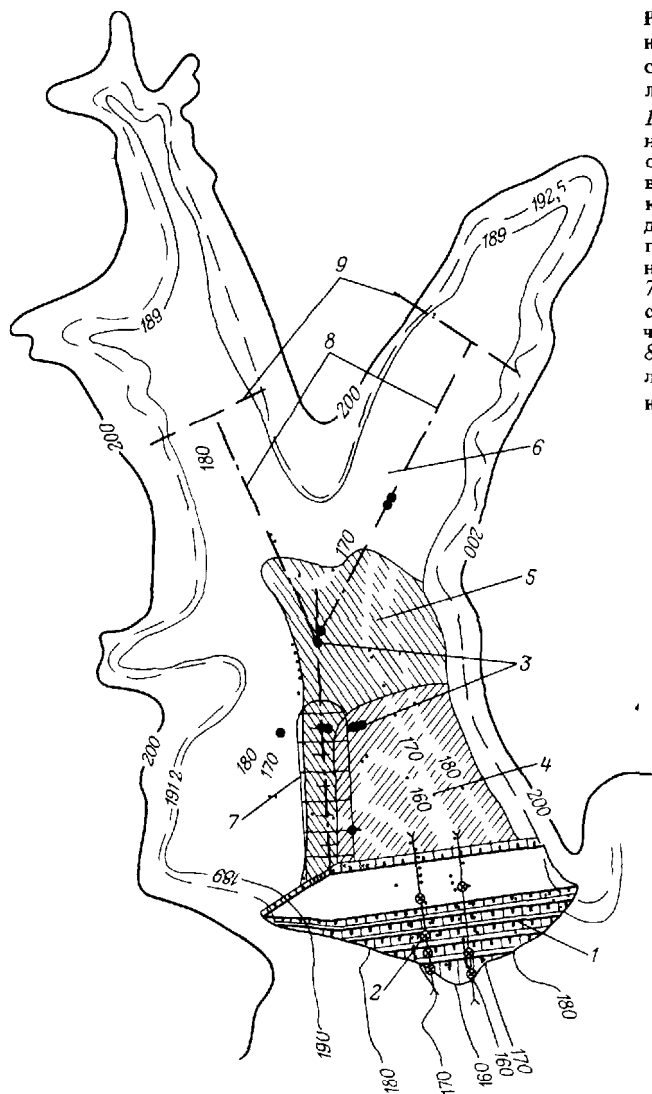


Рис. 33. Карта инженерно-геологического районирования гидроотвала в балке Чуфичева:

1 — откосные сооружения; 2 — точки стационарных замеров порового давления, 3 — точки комплексного зондирования, 4, 5, 6 — пляжная, промежуточная и ядерная зоны, 7 — дренажная призма соответственно (начальное положение), 8, 9 — проектное положение осей дренажных призм и дамб

вала "Березовый Лог". Для "отдыхающих" гидроотвалов карьера "Стрелица" приняты обобщенные показатели компрессии и консолидации глинисто-меловых грунтов линз в песчаной упорной призме, для гидроотвалов карьера "Средний" — соответствующие показатели пород первой секции гидроотвала "Березовый Лог". Выполненные с использованием принятых показателей расчеты уплотнения для случая "отдыха" намывного слоя на водоупоре (см. рис. 11, а) дали для центральных участков ядерных зон гидроотвалов № 3 и 5 карьера "Стрелица", № 2, 3, 4, 5 карьера "Средний" значения осадок, отличающиеся от измеренных на 10—15 %.

В Кузбассе натурные исследования состояния намывных массивов выполнялись Московским горным институтом на гидроотвалах "Бекровский", "Свободный" (разрез им. 50-летия Октября), "Новобачатский" (разрез "Краснобродский"), "Южный" (разрез "Колмогоровский"), № 3 (разрез "Кедровский") и "Прямой Ускаг" (разрез "Новосергеевский"). Процессы уплотнения глинистых грунтов этих гидроотвалов изучались также ВНИМИ, сотрудниками которого были выполнены измерения порового давления стационарными датчиками и определены осадки намывной толщи [7, 32].

Обработка результатов комплексного зондирования с целью определения коэффициентов консолидации намывных грунтов различных зон гидроотвалов выполнялась различными способами для действующих и заполненных ("отдыхающих") гидроотвалов.

Значения C_v для намывных масс действующих гидроотвалов определялись через установленную зондированием величину степени уплотнения с помощью графика $U = f(\mu)$, где $\mu = hv_n/C_v$ и v_n — темп намыва (см. рис. 9, б).

При обработке результатов зондирования намывных толщ, формирование которых уже завершилось, использовалось решение задачи уплотнения намывного слоя для периода его "отдыха" (см. рис. 11, а). Однако непосредственное использование графиков для обратных расчетов C_v не представляется возможным, так как степень уплотнения слоя определялась в зависимости от двух содержащих искомую величину параметров $\mu = hv_n/C_v$ и $m = \pi^2 C_v t / 4h$ (где t_0 — продолжительность периода "отдыха"). Поэтому был применен способ, основанный на использовании решения задачи уплотнения расположенного на водоупоре слоя переменной мощности для периода "отдыха" (прекращения намыва) в следующем виде:

$$U = \frac{\omega(P_{\text{эф}})}{\omega(P_{\text{ст}})} = 1 - \frac{32 \exp(-K C_v)}{\pi} \times$$

$$\times \frac{\pi \exp\left(-\frac{A}{2C_v}\right) \left[\frac{A^2 + 4AC_v + \pi^2 C_v}{C_v^2} \right] - \frac{(\pi^2 C_v - A^2)}{C_v}}{\frac{(A + 2C_v)}{C_v} \left(\frac{A^2 + \pi^2 C_v^2}{C_v^2} \right)^2 -$$

$$- \frac{\pi^3 \exp\left(-\frac{A}{2C_v}\right) - \frac{2(A^2 C_v + A^3 + 2\pi^2 C_v^3)}{C_v^3}}{\pi^2 \frac{(A^2 + \pi^2 C_v^2)(A + 2C_v)}{C_v^3}},$$

где

$$K = \frac{\pi^2}{4h^2} t_0; \quad A = hv_n.$$

Таблица 17

Зона гидроотвала	№ скв.	h, м	K, сут/м ²	A, м ² /сут	U	C _v , м ² /сут
Пляжная (I этап)	1	12	9,133	0,0566	0,64	4,86·10 ⁻²
	2	16	5,14	0,0755	0,5	4,81·10 ⁻²
	6	18	4,06	0,0849	0,45	4,78·10 ⁻²
Ядерная (I этап)	11	6,5	31,13	0,0196	0,9	3,68·10 ⁻²
	3	10,4	12,16	0,0314	0,73	3,61·10 ⁻²
	9	13,2	7,55	0,0399	0,63	3,56·10 ⁻²
Промежуточная (II этап)	11-а	6	158,53	0,0181	1,0	4,20·10 ⁻²
	8	10	57,071	0,0472	0,96	3,94·10 ⁻²
	5	13,1	33,256	0,0395	0,88	3,89·10 ⁻²
Ядерная (II этап)	2	11	47,166	0,0332	0,91	3,6·10 ⁻²
	4	13,5	31,315	0,0408	0,82	3,56·10 ⁻²
	7	16	22,29	0,0483	0,75	3,52·10 ⁻²

Применительно к условиям гидроотвала "Новобачатский" разреза "Краснобродский" на ЭВМ ЕС-1022 выполнялись обратные расчеты коэффициента консолидации C_v по данным зондирования, выполнявшегося через 4 (первый этап) и 9 лет (второй этап) после завершения намыва гидроотвала. Исходные данные и результаты обратных расчетов коэффициента консолидации намывных масс представлены в табл. 17.

Положение точек зондирования в плане и инженерно-геологический разрез гидроотвала "Новобачатский" показаны на рис. 34, 35.

Обратные расчеты позволили уточнить вид зависимости коэффициента консолидации C_v от уплотняющего давления (МПа·10⁻²) для зон:

$$\text{пляжной } C_v = 5,1 \cdot 10^{-2} \exp(-0,08q);$$

$$\text{промежуточной } C_v = 4,1 \cdot 10^{-2} \exp(-0,09q);$$

$$\text{ядерной } C_v = 3,8 \cdot 10^{-2} \exp(-0,11q).$$

Данные обратных расчетов на ЭВМ сопоставлялись с результатами определения C_v по графикам $U = f(C_v)$, получаемым с использованием решения задачи уплотнения для периода "отдыха" намывного слоя. Для известного диапазона C_v (0,01–0,1) м²/сут находят по графику $U = \varphi(\mu, t)$ значения U и строят зависимость $U = f(C_v)$, по которой через полученные в натурных условиях значения степени уплотнения определяют C_v для слоев различной мощности. Погрешность определения C_v по графику зависит от точности графических построений при интерполяции. Предложенная упрощенная методика обратных расчетов C_v применима для предварительной обработки данных зондирования в полевых условиях и для ориентировочных прогнозов уплотнения намывных массивов.

Полученные зависимости $C_v(q)$ использованы при расчетах порового

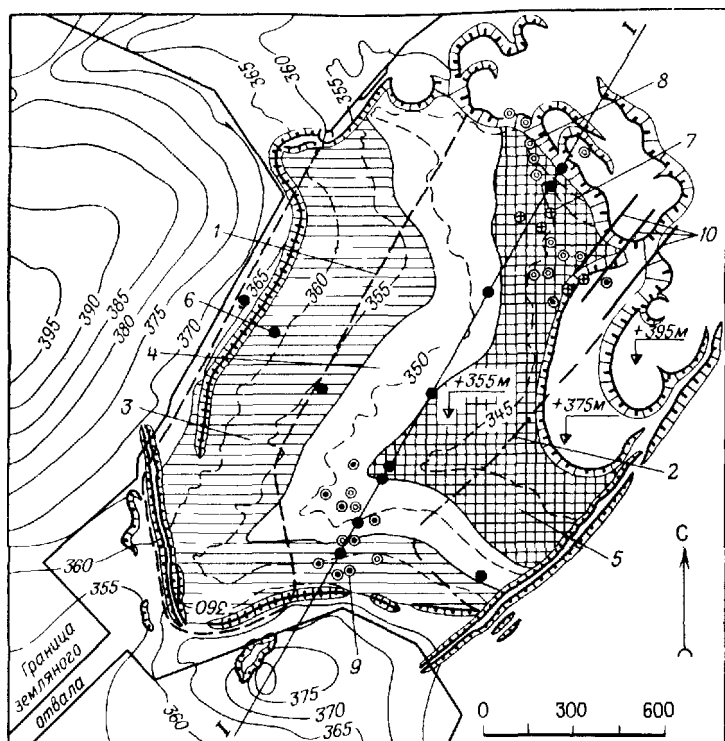


Рис. 34. Карта инженерно-геологического районирования гидроотвала "Новобачатский" (разрез "Краснобродский", Кузбасс).

1 — граница экскаваторного отвала, 2 — граница автомобильного отвала, 3, 4, 5 — зоны гидроотвала со степенью уплотнения намывных масс U соответственно 1,0, 0,8–0,9, 0,9–1,0, 6 — точки комплексного зондирования, 7 — стационарные датчики порового давления, 8 — точки зондирования штанговыми пьезодинамометрами, 9 — инженерно-геологические скважины, 10 — профили инструментальных наблюдений за осадками намывных полускальных пород

давления в намывных массивах других гидроотвалов Кузбасса, где выполнялось зондирование. На основе сопоставления расчетных и натурных данных этих зависимостей рекомендуются к использованию для всех исследованных гидроотвалов бассейна.

Натурные исследования процессов уплотнения намывных оснований должны включать как определение степени уплотнения (зондированием штанговыми пьезодинамометрами или по показаниям стационарных датчиков порового давления), так и замеры осадок. Систематические замеры порового давления $P_{\text{и}}$ и осадок S намывных толщ обеспечивают возможность определения по натурным данным всех расчетных показателей, необходимых для прогнозной оценки уплотняемости намывных тонкодисперсных грунтов. При известной степени уплотнения слоя U и измерен-

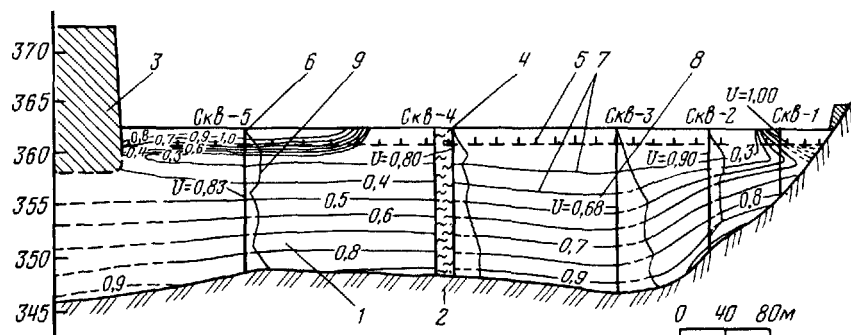


Рис. 35. Инженерно-геологический разрез гидроотвала "Новобачатский" по линии II-II на рис. 34:

1 — намывные глинистые грунты; 2 — почвенно-растительный слой; 3 — сухой отвал; 5 — лед; 5 — граница сезоннопромерзающего слоя; 6 — буровая или зондировочная скважина и ее номер; 7 — линии равных величин сопротивления сдвигу ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$); 8 — степень уплотнения намывной толщи; 9 — эпюры порового давления для намывной толщи

ной на момент времени t осадке его $S(t)$ приведенный коэффициент сжимаемости

$$a_0 = \frac{a}{1 + \epsilon_{\text{ср}}},$$

где $a = \Delta \epsilon / (\Delta g)$ — коэффициент сжимаемости, характеризующий изменение коэффициента пористости ϵ от уплотняющей нагрузки q ; $\epsilon_{\text{ср}}$ — средний коэффициент пористости для рассматриваемого диапазона уплотняющего давления определяется по выражению

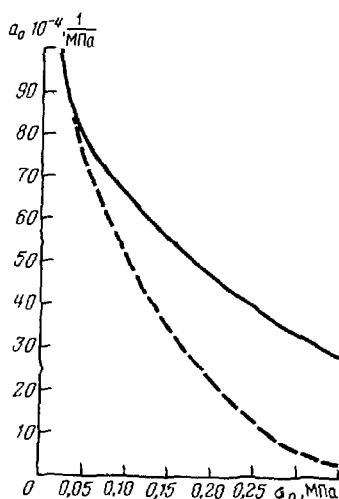
$$a_0 = \frac{S(t)}{U \omega (P_{\text{ср}})}.$$

Замеры осадок намывного массива проводились на гидроотвале "Новобачатский" в течение свыше 500 сут. около восточной дамбы гидроотвала в зоне намыва дробленых полускальных пород [33]. Уплотняющее давление (от собственного веса и полускальных пород) изменялось в пределах 0,03–0,2 МПа. По результатам обратных расчетов приведенного коэффициента сжимаемости был построен график $a_0 = f(q)$ (рис. 36) для пляжной и ядерной зон гидроотвала.

Обобщенные характеристики сопротивления сдвигу для грунтов гидроотвалов Кузбасса приводятся при рассмотрении вопросов инженерно-геологического районирования намывных территорий.

Сочетание измерений порового давления и осадок намывных слоев в период их "отдыха" (полного прекращения или перерыва в намыве) позволяет также получить из обратных расчетов параметры ползучести тонкодисперсных грунтов. При этом может использоваться методика, по-

Рис. 36. Зависимости приведенного коэффициента сжимаемости a_0 от уплотняющего давления σ_n для ядерной (сплошная) и пляжной (пунктирная) зон гидроотвала



добная предложенной М.Ю. Абелевым для естественных оснований, уплотняющихся под действием песчаной дамбы [15].

Экспериментальные исследования на гидроотвалах карьеров КМА и Кузбасса позволили изучить пространственную изменчивость свойств и состояния намывных масс различного "возраста". Выявлен характер изменчивости водно-физических показателей, вещественного состава, параметров нелинейной консолидации и сопротивления сдвигу для намывных масс пляжных, промежуточных и прудковых зон.

IV.4. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ НАМЫВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Инженерно-геологическое районирование позволяет сравнивать участки намывных массивов и определять вид и сроки их дальнейшего использования. Районирование предусматривает выделение в пределах исследуемых территорий однородных в инженерно-геологическом отношении таксономических единиц определенного уровня.

Материалы инженерно-геологического районирования намывных территорий должны обеспечивать решение следующих основных задач: увеличения вместимости действующих сооружений на основе форсирования консолидации тонкодисперсных грунтов;

подготовки намывных территорий для их дальнейшего народнохозяйственного использования (рекультивации или размещения сухих отвалов).

Для эффективного использования территорий гидроотвалов необходимо обладать надежной информацией о состоянии гидроотвала и уметь прогнозировать поведение намывных оснований во времени. В частности, при использовании территорий гидроотвалов под сухие отвалы или при рекультивации большое значение имеют несущая способность намывных масс и изменения ее во времени.

Для определения допустимых нагрузок на намывные основания использован расчетный метод, рассмотренный в разд. III.2. Степень уплот-

нения намывных толщ определялась в соответствии с расчетными схемами, рассмотренными в разд. II.2. Оценка несущей способности производилась по графику функции $P_{\text{пр}}/C(U) = f[\varphi(U), a]$ (см. рис. 20). Зависимости характеристик сопротивления сдвигу намывных грунтов (сцепления C и угла внутреннего трения φ) от времени t устанавливались через степень уплотнения U . Дополнительная пригрузка массива пористым штампом с давлением q учитывается коэффициентом $a = q/C$. Величина допустимого давления на намывной массив определяется в виде $P_{\text{доп}} = P_{\text{пр}}/\eta$, где $\eta = 1,2$ — коэффициент запаса.

Районирование территории гидроотвала "Березовый Лог" (КМА) выполнено с учетом состояния намывного массива, максимальная мощность которого превышает 70 м (рис. 37). В качестве основной таксономической единицы принимаются слои глинисто-мелового состава; в пределах массива выделяются четыре инженерно-геологических участка (табл. 18). Основными признаками выделения участков служили гранулометрический состав, показатели водно-физических свойств, степень уплотнения (по данным натурных замеров P_H), параметры сопротивления сдвигу (преимущественно по данным вращательных срезов), характеристики сжимаемости (a и C_v).

Оптимизация сети инженерно-геологического опробования и уточнение границ участков осуществлялись на основе данных аэрофотосъемки гидроотвала.

Обобщенные компрессионные зависимости $\epsilon = f(P)$ для глинисто-меловых пород в пределах участков гидроотвала "Березовый Лог" даны на рис. 21. При построении инженерно-геологических разрезов намывного массива указывались расчетные значения остаточных осадок $S_{\text{ост}}$ после завершения формирования гидроотвала (см. рис. 29).

Материалы инженерно-геологического районирования гидроотвалов "Березовый Лог" и "Балка Чуфичева" использованы при разработке спецтехнологии намывных работ, обеспечивающей ускоренную рекультивацию гидроотвалов. В частности, положение осей дренажных раздельных призм приурочено к границам инженерно-геологических участков. Режим возведения дренажных элементов устанавливался дифферен-

Таблица 18

№ участка	Содержание фракций, %			Плотность γ , г/см ³	Плотность минеральных частиц Δ , г/см ³	Влажность W , %
	Песок > 0,05 мм	Пыль 0,05–0,0005 мм	Глина < 0,005 мм			
I-a	21,1	31,6	48,3	1,91	2,68	31
I-b	27,5	28,97	43,53	1,97	2,67	23,6
II	10,7	44,3	45	1,90	2,70	33,0
III-a	3,9	46,4	49,7	1,86	2,71	33,8
III-b	2,3	47,1	50,6	1,80	2,71	34,8
IV	0,4	47,4	52,2	1,79	2,75	37–40

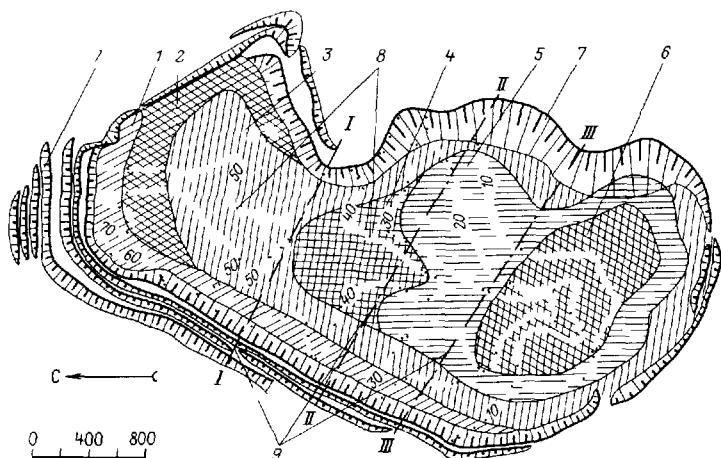


Рис. 37. Карта инженерно-геологического районирования гидроотвала "Березовый Лор" (КМА):

1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно инженерно-геологические участки I-а, I-б, II, III-а, III-б, IV, 7 – откосные сооружения гидроотвала; 8 – изолинии мощности намывной толщи, 9 – линии инженерно-геологических разрезов I, II и III соответственно по осям первой, третьей и второй дренажных разделительных призм

цировано для различных зон гидроотвалов также с использованием материалов инженерно-геологического районирования. Установление степени уплотнения намывного массива на 1980 г. позволило оценить ее значения и соответственно допустимые нагрузки для различных участков на последующие годы.

Несущая способность намывных масс гидроотвалов Кузбасса определялась по обобщенным показателям, приведенным в разд. IV.3.

Величина $P_{\text{доп}}$ определялась как функция времени "отдыха" для трех случаев консолидации массива гидроотвала:

уплотнение под действием собственной массы ($\alpha = 0$);

Начальный коэффициент пористости, ϵ_0	Угол внутреннего трения φ , градус	Сцепление C , МПа	Степень уплотнения U (на 1980 г)	Коэффициент консолидации $C_v(q)$, $\text{м}^2/\text{сут}$
0,83	16	0,04	1	$0,09 \exp(-0,11q)$
0,68	18	0,04	1	$0,14 \exp(-0,07q)$
0,89	14–16	0,025–0,03	0,8–1	$0,11 \exp(-0,09q)$
1,10–1,15	12	0,02	0,7	$0,08 \exp(-0,11q)$
	10	0,015	0,5	
1,10–1,15	8–10	0,015–0,01	0,25–0,5	$0,06 \exp(-0,13q)$

уплотнение с учетом внешней нагрузки от слоя дренирующего материала мощностью 2 м, используемого для перекрытия намывной толщ глинистых пород ($\alpha = 4$);

уплотнение с учетом внешней нагрузки от предотвала высотой 5 м ($\alpha = 10$).

Расчеты несущей способности производились для трех инженерно-геологических зон гидроотвала при изменении степени уплотнения в диапазоне $U = 0-1$.

Степень уплотнения намывного массива определялась по графику функции $U = f(\mu, m)$ для слоя, расположенного на водоупоре (см. рис. 11, а). При этом темп намыва принимался равным $v_H = 4$ м/год, а продолжительность периода отдыха $t_0 = 1-20$ лет.

Уточнение значений C (МПа·10⁻²) и φ (градус) для намывных массивов различной мощности, с разными показателями времени "отдыха" производилось с использованием зависимостей вида:

$$\varphi = \varphi_3 + K_1 U;$$

$$C = C_3 + K_2 U,$$

где K_1 и K_2 — эмпирические постоянные; для пляжной зоны $K_1 = 14$, $K_2 = 0,1$; для промежуточной зоны $K_1 = 14$, $K_2 = 0,07$; для прудковой зоны $K_1 = 13$; $K_2 = 0,05$; φ_3 , C_3 — значения соответственно угла внутреннего трения и сцепления, полученные по результатам испытаний грунтов в условиях закрытой системы.

Определив по графику для оценки несущей способности намывных оснований $P_{пр}/C = f(\varphi, \alpha)$ величину $P_{пр}$ и зная изменение во времени величины C для участков гидроотвала с различной мощностью намывных масс, можно рассчитать значение $P_{доп}$.

По результатам расчетов построены графики зависимости изменения несущей способности намывных масс и гидроотвалов от времени их "отдыха" и мощности глинистой толщи для трех инженерно-геологических зон намывного массива. На рис. 38 приведены такие зависимости для ядерных зон гидроотвалов Кузбасса. Графики зависимости $P_{доп} = f(h_{я})$,

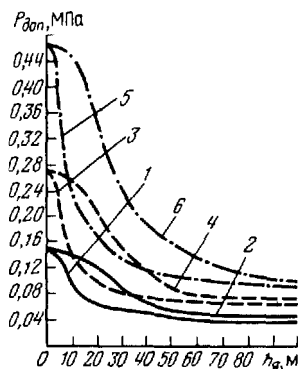


Рис. 38. Зависимости несущей способности $P_{доп}$ намывных глинистых грунтов от мощности ядерных зон $h_{я}$ гидроотвалов (Кузбасс) при $\alpha = 0$ (сплошные), $\alpha = 2$ (пунктирные), $\alpha = 4$ (штрихпунктирные); 1, 3, 5 — $t_0 = 1$ год; 2, 4, 6 — $t_0 = 20$ лет

t_0, α) дают возможность прогнозировать на период до 20 лет состояние намывного массива мощностью от 5 до 100 м. Полученные зависимости позволяют определить продолжительность периода, за который массив гидроотвала заданной мощности достигает необходимой несущей способности. Для этого по оси ординат отмечают требуемую величину $P_{\text{доп}}$, а по оси абсцисс — мощность глинистой толщи h_g ; точка пересечения нормалей определяет область интерполяции по вертикали. В результате интерполяции получают время "отдыха", в течение которого будет достигнута требуемая величина $P_{\text{доп}}$.

Схема районирования методом аналогов, предусматривающая выборочное зондирование территорий гидроотвалов, учитывает специфику намывных объектов бассейна. Методика инженерно-геологического опробования базируется на теории изменчивости инженерно-геологических свойств грунтов, имеющей как пространственный, так и временной аспект. Изменчивость свойств намывных грунтов обусловлена изменением их вещественного состава; структурно-текстурных особенностей, механических свойств в зависимости от применяемой технологии гидравлического складирования, состава вскрышных пород и продолжительности "отдыха" после намыва (закономерности изменения этих параметров инженерно-геологических свойств принято называть режимом изменчивости).

Режимы изменчивости свойств изучались в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вкост фронта намыва, по фронту намыва и по глубине.

Анализ результатов инженерно-геологических исследований на территориях гидроотвалов позволяет определить характер изменчивости физико-механических свойств намывных грунтов по всем главным ее направлениям, что, в свою очередь, обусловило возможность проведения специального инженерно-геологического районирования на каждом изучаемом объекте.

В качестве основы для разработки рекомендаций по повышению вместимости гидроотвалов и ускоренному использованию их территорий после прекращения намыва следует использовать инженерно-геологические карты гидроотвалов. Ниже излагаются результаты инженерно-геологического картирования ряда гидроотвалов разрезов Кузбасса. Характеристики гранулометрического состава и водно-физических свойств грунтов этих гидроотвалов даны в табл. 19.

Гидроотвал № 3 разреза "Кедровский" расположен к северу от центральной части разреза. К настоящему времени в тело гидроотвала уложено более 48 млн. м³ грунта.

Дамба гидроотвала высотой 55 м, длиной 610 м с заложением откоса 1:6 сложена песчаниками (90 %) и алевролитами (10 %). В результате намыва глинистых грунтов в верховье гидроотвала прудок приблизился к дамбе на недопустимо малое расстояние — 20÷50 м. За счет повышения уровня прудка-отстойника коэффициент запаса устойчивости снизился, и стали наблюдаться деформации выпирания намывного основания.

Таблица 19

Гидроузлы	Зона	Содержание частиц, %			Плотность минераль- ных час- тиц, г/см ³	Плотность, г/см ³	Порис- тость, %	Влаж- ность, %	Начальный коэффици- ент порис- тости	Кoeffици- ент водона- сыщения
		>0,05 мм	0,05- 0,005 мм	<0,005 мм						
"Новобачат- ский"	Пляжная	—	—	—	2,65	1,90	0,45	31	0,83	1,0
разреза "Красно- броецкий"	Промежу- точная	12,8	56	31,2	2,7	1,90	0,47	32,5	0,88	1,0
	Прудковая (ядерная)	8,9	50	41,1	2,75	1,88	0,5	34,9	0,97	1,0
№ 3	Пляжная	23,4	58,1	18,5	2,66	1,90	0,46	31,2	0,84	0,97
разреза "Кедров- ский"	Промежу- точная	19,7	57,3	23	2,70	1,88	0,48	34,0	0,93	0,99
	Прудковая (ядерная)	14,8	53,2	32,0	2,73	1,87	0,49	35,2	0,97	1,0
"Бесковс- кий"	Пляжная	17,6	76,4	6,0	2,67	2,0	0,45	36,0	0,83	1,0
разреза им. 50-ле- тия Ок- тября	Промежу- точная	14,3	69,2	16,5	2,72	1,94	0,48	36,0	0,92	1,0
	Прудковая (ядерная)	11,8	58,4	29,8	2,76	1,90	0,49	34,8	0,96	1,0

II — промежуточная, примыкает к приоткосной и протягивается вдоль краев чаши гидроотвала, мощность намывных масс от 5 до 40 м;

III — прудковая, самая обширная, занимает до 80 % территории гидроотвала, мощность намывных масс здесь минимальная.

В связи с продолжением намывных работ и отсутствием мероприятий по форсированию уплотнения тонкодисперсных масс их прочностные характеристики для всех зон гидроотвала близки к минимальным значениям. Размещение прудка-отстойника в приоткосной зоне привело к накоплению здесь тонкодисперсных неуплотненных масс, что является недопустимым с позиций как обеспечения устойчивости дамбы, так и складирования сухих отвалов после завершения намыва гидроотвала. На основании расчетов устойчивости дамбы гидроотвала и оценки несущей способности намывных масс с помощью графиков $P_{доп} = f(h_y, t_0, a)$ при $t_0 = 0-6$ мес (см. рис. 39) предложено изменить порядок намыва для перемещения прудка в верховье гидроотвала. Внедрение разработанных с учетом результатов инженерно-геологического районирования рекомендаций позволило дополнительно уложить в тело гидроотвала 250 тыс. м³ глинистых пород, ранее исключенных из гидровскрышных объемов. Гидроотвал "Бековский" разреза им. 50-летия Октября расположен на водоразделе рек Большой и Малый Бочат в Бековском Логу. Гидроотвал овражно-балочного типа. Мощность намывных масс превышает 45 м. Заполнение чаши гидроотвала производилось с четырехгодовичным перерывом в намыве. Фактический годовой объем укладываемых пород составляет 2,5–3 млн. м³. Дамба гидроотвала высотой около 50 м сложена суглинками и местным щебенисто-дресвяным грунтом. Дамбы наращивания отсыпаются по намытому пляжу. Для уменьшения фильтрации через дамбу предусмотрена отсыпка экрана из местного суглинистого грунта.

Инженерно-геологическое районирование территории гидроотвала "Бековский" проводилось по состоянию на конец 1986 г. При проведении инженерно-геологического районирования гидроотвала также выделяются три зоны по мере удаления от фронта намыва, характеризующиеся различной изменчивостью несущей способности во времени (рис. 40).

Зона I — приоткосная, притягивается полосой шириной от 50 до 200 м вдоль дамбы гидроотвала. Мощность намывных масс в этой зоне достигает максимальных значений ($h_y = 50$ м). В пределах приоткосной зоны выделены четыре инженерно-геологических участка с $P_{доп} = 0,063 \div 0,166$ МПа.

Зона II — промежуточная, следует за приоткосной и протягивается полосой вдоль фронта намыва. В пределах этой зоны выделены три инженерно-геологических участка с $P_{доп} = 0,055 \div 0,087$ МПа.

Зона III — прудковая, самая обширная, занимает до 60–70 % всей территории, мощность намывных масс в ней наименьшая. Зона разделена на три инженерно-геологических участка с $P_{доп} = 0,044 \div 0,123$ МПа.

Значения $P_{доп}$ соответствуют продолжительности периода "пассивного отдыха" намывной толщи $t_0 = 1$ год. В пределах перечисленных зон

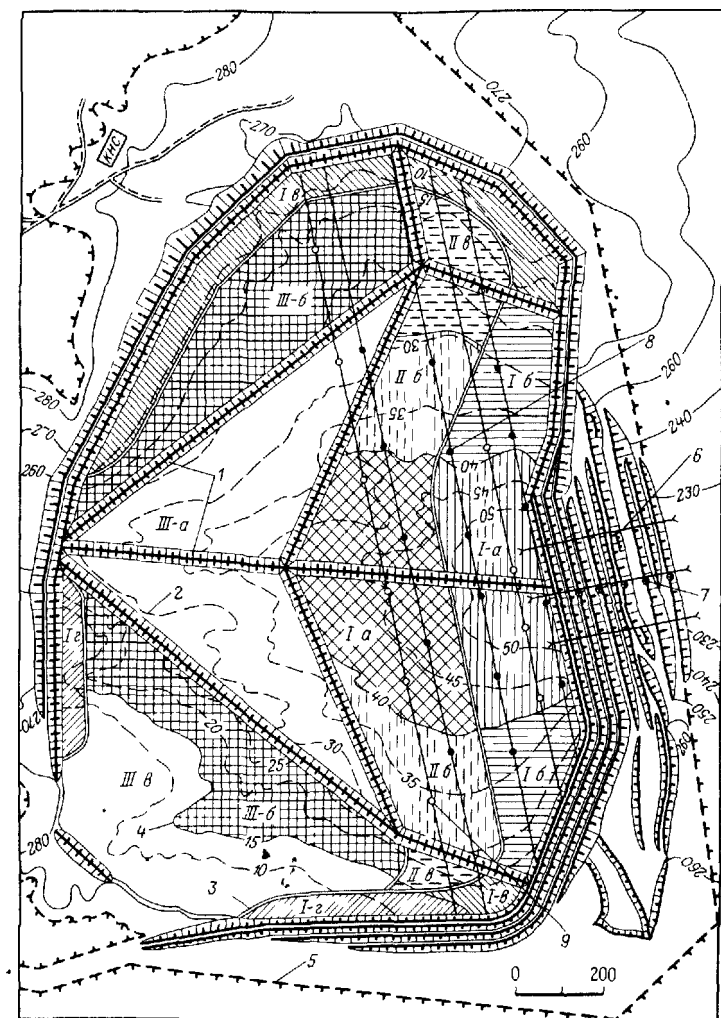


Рис. 40. Карта инженерно-геологического районирования гидроотвала "Бековский":

I (а, б, в, г), II (а, б, в), III (а, б, в) – инженерно-геологические участки соответственно в пределах пляжной, промежуточной, ядерной зон; *1* – дренажные призмы; *2* – изолинии мощности намывной толщи; *3* – границы зон гидроотвала; *4* – границы участков; *5* – граница земельного отвода; *6* – створы пьезометров; *7* – стационарные датчики порового давления; *8* – точки комплексного зондирования, *9* – инженерно-геологические скважины

гидроотвала "Бековский" выделяются инженерно-геологические участки, различающиеся по мощности и степени уплотнения намывных грунтов (см. рис. 40). Пространственное положение инженерно-геологических зон и участков учитывается при проектировании сети дренажных элементов в тонкодисперсных грунтах.

Гидроотвал "Новобачатский" разреза "Краснобродский" относится к овражно-балочному типу, намыв гидроотвала закончен. Максимальная мощность намывных масс — до 25 м. В настоящее время приоткосная (пляжная) и большая часть промежуточной зоны заняты сухими отвалами. В зависимости от степени уплотнения свободную территорию гидроотвала целесообразно подразделять на три участка (см. рис. 34). Участок I характеризуется максимальной мощностью намывных масс со степенью уплотнения $U = 0,8-0,9$. На участке II мощность грунтовых масс составляет 12–16 м при степени уплотнения $U = 0,9-1$. На участке III мощность намывного массива составляет до 12 м при степени уплотнения его $U = 1$. С учетом результатов комбинированного зондирования определенные путем обработки данных вращательных срезов и замеров порового давления параметры сопротивления сдвигу при переходе от I к III зоне изменяются в следующих пределах: $\varphi = 16-19^\circ$; $C = 0,016-0,02$ МПа.

Описанный способ инженерно-геологического районирования территорий гидроотвалов предусматривает обязательный учет изменения во времени несущей способности намывных массивов пляжных, промежуточных и прудковых зон гидроотвалов. Материалы районирования (графики $P_{доп}$ и карты) использованы для обоснования размещения дополнительных объемов гидравлической или сухой вскрыши в контурах действующих или заполненных гидроотвалов и ускоренной подготовки их территорий к рекультивации.

ГЛАВА V

НАПРАВЛЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СОСТОЯНИЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

V.1. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ НА СОСТОЯНИЕ НАМЫВНОГО МАССИВА

Традиционным направлением обеспечения устойчивости дамб при повышении вместимости гидроотвалов и хвостохранилищ является усиление откосных сооружений в сочетании с проведением дренажных мероприятий. Повышение высоты ограждающих дамб гидроотвалов тонкодисперсных и смешанных грунтов влечет за собой формирование неконсолидированных толщ в приоткосных зонах. Поэтому возникает необходимость выполаживания внешних откосов за счет создания берм и формирования пригрузки. Конструкция ограждающих дамб хвостохранилищ определяется в зависимости от условий устойчивости обводненного массива материала откосных сооружений (водоупорного или водопроницаемого с противофильтрационными экранами), вида складываемых отходов (гранулометрического состава и степени токсичности), а также (аналогично гидроотвалам) от механических свойств и геологи-

ческого строения основания. Вопросы выбора конструкции и параметров откосных сооружений хвостохранилищ рассмотрены в работах [3, 4, 5, 20, 50]. В связи с формированием приоткосных зон хвостохранилищ из раздельнозернистых материалов влияние конструкции дамб на состояние намывного массива оценивалось преимущественно с учетом развития фильтрационных процессов.

При формировании дамб гидроотвалов характер их взаимодействия с намывными массивами тонкодисперсных грунтов приобретает большое значение с позиций оценки условий уплотнения (упрочнения) грунтов приоткосных зон и разработки мер по ускорению этих процессов.

Рассмотрим некоторые примеры управления состоянием приоткосных зон гидроотвалов.

Выполаживание откосов с целью снижения сдвигающих сил по вероятной поверхности скольжения производилось на гидроотвале "Березовый Лог", где конечная высота северной упорной призмы составила 74 м. В качестве дренажных устройств применялись горизонтальные дрены (двухъярусный грубчатый дренаж) и (в ограниченном объеме) гравийно-щебеночные призмы. Перед внедрением мероприятий по выполаживанию и систематическому дренажу на внешнем откосе гидроотвала происходило оплывание песков, интенсивность которого зависела от темпов намыва. Внешний откос песчаной упорной призмы выполаживался путем создания бермы шириной до 100 м за счет перемещения фронта намыва (рис. 41). На основании натурных данных и расчетов уплотнения глинисто-меловых линз для управления процессом уплотнения тонкодисперсных грунтов на северо-западном участке дамбы была использована намывная песчаная подушка вместо кварцитной пригрузки низового откоса. Расчеты и натурные наблюдения для этапов формирования гидроотвала, соответствующих увеличению его высоты с 58 до 74 м, установили значительное повышение коэффициента запаса устойчивости откоса ($\eta > 1,4$) в результате выполнения перечисленных мероприятий.

Наличие глинисто-меловых линз мощностью до 6 м в теле песчаной упорной призмы гидроотвала позволило оценить эффективность послойного намыва и разработать новую конструкцию ограждающих дамб для гидроотвалов разрезов Кузбасса с использованием в качестве "натурной модели" объекта в бассейне КМА. Применительно к условиям гидроотвалов разрезов им. 50-летия Октября, "Краснобродский", "Кедровский", "Новосергеевский" ПО "Кемеровоуголь" рассматривались следующие варианты формирования ограждающих дамб при гидравлическом складировании:

полускальных пород на естественном или намывном глинистом основании — с пригрузкой низового откоса ограждающей дамбы;

глинистых грунтов — с пригрузкой низового откоса дамбы полускальными породами вскрыши и (или) созданием дренажных линз в пляжной зоне при соответствующем расположении дамб наращивания.

Усиление ограждающих дамб контрбанкетами (отсыпкой "сухих" вскрышных пород) применяется также на хвостохранилищах ГОКов Кривбасса, Соколовско-Сарбайского и на ряде предприятий цветной

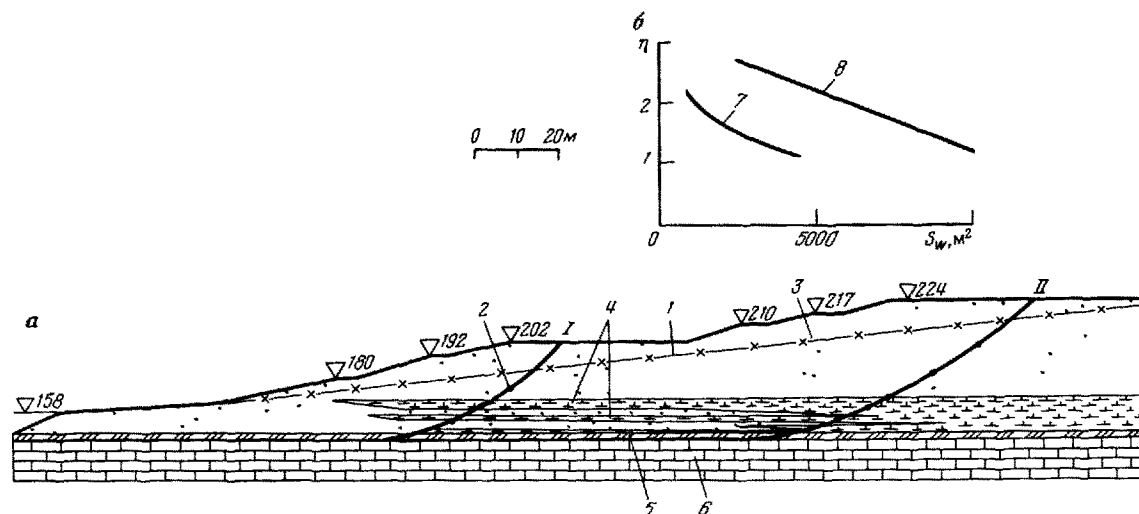


Рис. 41. Профиль северной упорной призмы гидроотвала "Березовый Лог" (а) и зависимости коэффициента запаса ее устойчивости η от площади эпюры давления воды S_w по вероятным кривым скольжения (б) :

I — депрессионная кривая; 2 — датчики-пьезодинамометры, 3 — песок намывной, 4 — глинисто-меловые линзы, 5 — суглинки основания; 6 — коренной мел, 7, 8 — зависимости для определения η соответственно по кривым *I* и *II*

металлургии. Выполненные на разрезах им. 50-летия Октября и "Краснобродский" промышленные испытания гидравлического транспортирования и складирования полускальных вскрышных пород выявили ряд важных преимуществ гидравлического способа. В целях обоснования параметров гидроотвалов полускальных пород выполнялись расчеты уплотнения естественных и намывных глинистых оснований при различных темпах намыва и расчеты устойчивости ограждающих дамб [34].

Зависимости удельных объемов пригрузки $V_{\text{пр}}$ ($\text{м}^3/\text{м}$) от высоты дамбы $H_{\text{д}}$ и темпа намыва полускальных пород $v_{\text{н}}$ ($\text{м}/\text{год}$) описываются следующей формулой (по С.М. Марченко и Н.Н. Медникову):

$$V_{\text{пр}} = 0,25 (0,01 + \sqrt[6]{v_{\text{н}}/H_{\text{д}}}) H_{\text{д}}^3,$$

где $H_{\text{д}}$ — высота дамбы из полускальных пород на намывном глинистом основании. Эта формула получена в результате обработки кривых $V_{\text{пр}} = f(H_{\text{д}}, v_{\text{н}})$, построенных по данным расчетов устойчивости дамб при их наращивании на намывных суглинках. Расчетами устойчивости дамбы гидроотвала полускальных пород, размещаемого на основании из суглинков естественного залегания средней мощностью $h_0 = 6$ м, установлено, что в этом случае

$$V'_{\text{пр}} = \lambda_0 V_{\text{пр}},$$

где λ_0 — поправочный коэффициент, зависящий от первоначальной мощности намытых суглинков h_c .

при $h_c = 0$ $\lambda_0 = 0,38$; при $h_c = 16$ м $\lambda_0 = 1,0$.

Для повышения вместимости при обеспечении нормативного коэффициента запаса устойчивости упорных призм МГИ предложено осуществлять на гидроотвалах Кузбасса расчленение пляжной зоны по вертикали фильтрующими насыпными или намывными линзами и пригрузку низовых откосов фильтрующим материалом. Линзы разделяют глинистую толщу пляжной зоны на слои и ускоряют консолидацию намывного массива за счет сокращения пути фильтрации поровой воды.

Насыпные дренажные линзы создавались на гидроотвале № 3 разреза "Кедровский", где полная реализация этого мероприятия позволит использовать территорию пляжной зоны для размещения сухого отвала с минимальной дальностью транспортирования вскрыши. Установлено, что для достижения нормативного коэффициента запаса устойчивости ($\eta = 1,3$) и обеспечения несущей способности ($P_{\text{доп}} = 0,15$ МПа) намывной массив мощностью до 40–50 м необходимо разделять по вертикали не менее чем двумя линзами при расположении нижней и верхней линз соответственно на глубине 20–25 и 5–10 м. Предложенная Ю.В. Кириченко конструкция насыпных дренажных элементов предусматривает создание рассредоточенных в плане и профиле дренажных линз, гидравлическая связь между которыми осуществляется с помощью соединительных дренажных призм. Такая конструкция позволяет создавать дренажные элементы минимального объема в пределах пляжных и части промежуточных зон за период между сезонами намыва.

На гидроотвалах разрезов им. 50-летия Октября и "Новосергеевский" дренажные линзы в пляжных зонах целесообразно создавать из намывных отходов углеобогащения на крутонаклонных сепараторах. Применительно к условиям гидроотвалов "Бековский" и "Прямой Ускат" выполнены расчеты устойчивости дамб с целью выбора их конструкции, обеспечивающей повышение фактического объема гидроотвала.

Составленный Сибгипрошахтом проект гидроотвала "Бековский" предусматривал формирование дамбы высотой до 73 м при помощи системы призм из полускальных пород с глинистыми экранами, укладываемых на намывные глинистые грунты. Значительный разнос промежуточных призм (расстояние между их осями составляет 50 м) определяет пологий генеральный угол откоса дамбы (около 7°). Для увеличения полезного объема гидроотвала МГИ рассматривались варианты пригрузки низового откоса дамбы полускальными вскрышными породами с формированием насыпных дренажных линз и создания намывных дамб наращивания в сочетании с намывными дренажными линзами. Реализация первого варианта требует значительных затрат на организацию железнодорожного отвала у низового откоса дамбы. Рекомендуемая в соответствии со вторым вариантом конструкция дамбы показана на рис. 42. На гидроотвале начато формирование откосных сооружений гидроотвала из намывных отходов углеобогащения. В результате расчетов, выполненных с использованием данных комбинированного зондирования приоткосной зоны, выбрана такая конструкция дамбы, при которой обеспечивается общая и местная устойчивость системы откосов с увеличением объема гидроотвала по сравнению с проектным на 5 млн. м^3 .

Аналогичная конструкция дамбы гидроотвала "Прямой Ускат" обеспечивает увеличение срока его службы при размещении дополнительного (по сравнению с проектом Кузбассгипрошахта) объема гидровскрыши около 4 млн. м^3 . На этом гидроотвале формирование откосных сооружений из намывных отходов углеобогащения может осуществляться на значительной части дамбы (по ее длине) без монтажа перекачной станции благодаря существенному превышению (около 15 м) горизонта установки землесоса над верхней площадкой дамбы.

Создание дренажных линз обеспечивает ускорение консолидации тонкодисперсных грунтов пляжных зон и повышение удерживающих сил (сопротивления сдвигу) по поверхности скольжения. В результате увеличения вместимости гидроотвалов достигается значительный экономический эффект за счет исключения затрат на вывоз вскрыши колесными видами транспорта или сокращения дальности доставки гидровскрыши.

В качестве важнейшего мероприятия при гидроотвалообразовании рассматривается дренаж упорных призм. Схемы дренажа и условия их эффективного применения приведены в табл. 20. Типизация схем дренажа разработана в НИИКМА М.А. Дергилевым [2].

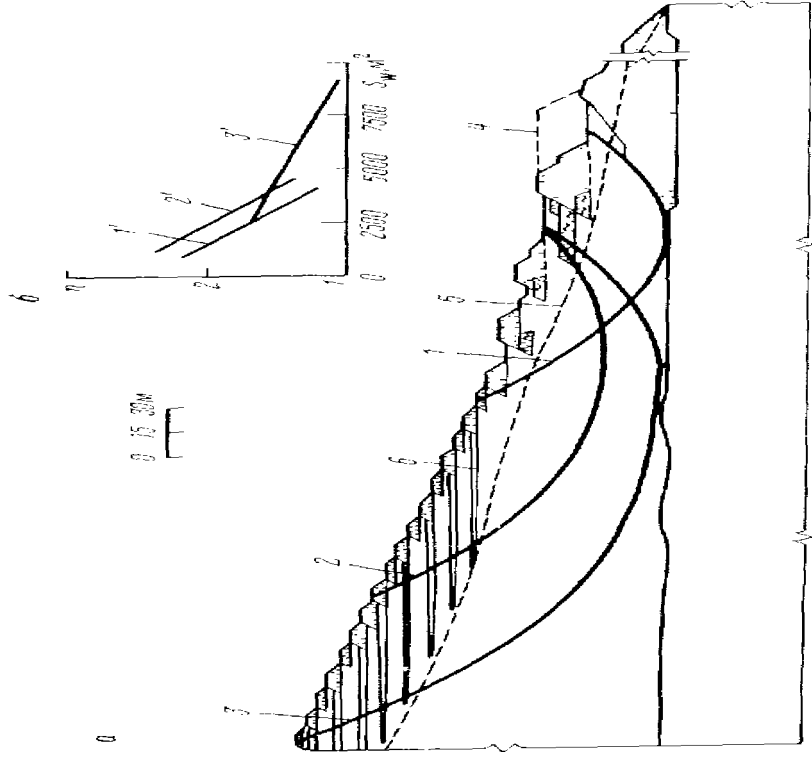


Рис. 4.2. Рекомендуемая конструкция дамбы гидротвала "Боскjen" (а) и зависимость (кривые 1, 2, 3) коэффициента запаса ее устойчивости η от площади опоры дамба $S_{\text{оп}}$ по вероятным кривым скольжения 1, 2, 3 (б). 4 – контур шпунта, 5 – кривая перекоса, 6 – дренажные линии.

Таблица 20

Тип дренажа	Схема	Условия эффективного применения
Постельный I		При намыве суглинистых пород в гидротвалы (высотой 10–15 м), основание которых представлено глинистыми породами или торфом. Дренаж ускоряет процесс консолидации намывных грунтов основания и позволяет увеличить удерживающую способность упорной призмы и интенсивность ее намыва
Наклонный II		В условиях интенсивного оплывания откосов упорной призмы и при наличии в непосредственной близости гравийно-галечного, щебеночного или кварцитового материалов
Песчаная (наклонная) диафрагма III		При строительстве упорных призм на естественных склонах путем отсыпки разнородных пород без применения укатки. Дренаж исключает снижение механических свойств пород, отсыпанных со стороны низового откоса, за счет глубинного перехвата фильтрационного потока
Песчаная диафрагма в сочетании с системой песчаных свай IV		При отсыпке упорных призм из разных пород в тальвегах балок и пониженных участках склонов и наличии на небольшой глубине трещиноватых пород или безнапорного водоносного горизонта. Дренаж обеспечивает глубинный перехват фильтрационного потока (см. III тип дренажа)
Песчаная диафрагма в сочетании с системой сбросных скважин V		См. IV тип дренажа На участках глубокого залегания трещиноватых зон или безнапорного водоносного горизонта. Дренаж обеспечивает резкое снижение депрессионной поверхности и исключает замачивание пород, отсыпанных со стороны низового откоса упорной призмы
С применением системы водопоглощающих скважин VI		При строительстве упорной призмы из хорошо фильтрующих (песчаных) пород, наличии в основании зоны водопоглощения и необходимости дальнейшего наращивания гидротвала по высоте. Путем глубинного снижения депрессионной поверхности повышается устойчивость откоса

Тип дренажа	Схема	Условия эффективного применения
Горизонтальный трубчатый VII		При предотвращении оплыwania намытого откоса и выхода депрессионной кривой на вышележащую берму
Самотечный в сочетании с системой закладных дрэн или горизонтальных дренажных скважин VIII		При дефиците песчаного материала. Одно- или многоярусный дренаж исключает оплыwanie откосов и обеспечивает их устойчивость за счет значительного влияния гидродинамического фактора
Горизонтальный трубчатый в сочетании с системой горизонтальных дренажных скважин IX		В случаях развития в откосах фильтрационных деформаций, дефицита песчаного материала для строительства упорных призм, необходимости дальнейшего наращивания гидроотвала по высоте
Послойная дренажная пригрузка X		При раздельной разработке песчаных и глинистых пород. Дренаж ускоряет процесс консолидации глинистых пород, за счет чего увеличивается приемная способность гидроотвала и значительно сокращается объем разжиженной (ядерной) зоны

V 2. ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ

Промышленному внедрению новой технологии формирования гидроотвалов предшествовали опытные работы по упрочнению слабых грунтов намывных и естественных оснований подушками из фильтрующих материалов, представленных полускальными дроблеными породами (Кузбасс), песками и отходами рудообогатения (КМА, Воронежская АЭС). Постановка опытных работ осуществлена С.М. Марченко и Ю.Н. Дьячковым.

На разрезе "Краснобродский" применяли промышленную гидроустановку для транспортирования и укладки полускальных пород, отдельные элементы которой показаны на рис. 43.

Экскаватор ЭКГ-4,6 разрабатывал уступ высотой 10 м по веерной схеме. Ширина заходки достигала 25–30 м, шаг передвижки установки был равен 15–20 м. Объем породы, разрабатываемой с одного положения установки, достигал 5000–6000 м³.

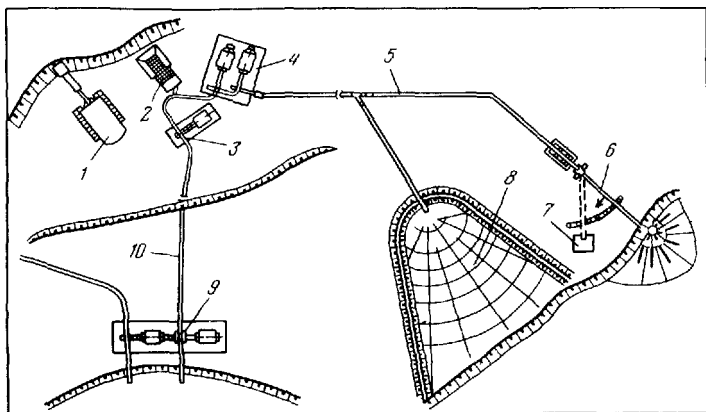


Рис. 43. Схема гидротранспортирования и укладки полускальных пород:

1 — экскаватор ЭКГ-4,6; 2 — передвижная дробилка; 3 — насос 14Д6; 4 — землесос ЗГМ-2М; 5 — пульповод; 6 — поворотный лоток; 7 — пробоотборник; 8 — участок опытного намыва; 9 — насос 20 Д6; 10 — водовод

Экскаватором ЭКГ-4,6 порода подавалась в установку, состоящую из смонтированных на сварной раме бункера вместимостью около 10 м^3 , качающегося грохота-питателя с приводом, молотковой дробилки и зумфа для приготовления гидросмеси. Передвижка установки осуществлялась экскаватором и бульдозером ДЭТ-250.

Из зумфа порода засасывалась гидроэлеватором и транспортировалась до землесосной станции, состоящей из двух землесосов ЗГМ-2 м, соединенных последовательно. Землесосами гидросмесь транспортировалась по трубопроводу диаметром 500 мм, длиной 800 м в гидроотвал "Новобачатский".

Породы были представлены трещиноватыми алевролитами и песчаником на глинистом цементе с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 4 \div 5$. Для улучшения условий работ экскаватора и повышения производительности гидроустановки коренные породы разрабатывались с рыхлением буровзрывным способом при расположении скважин по сетке $6 \times 6 \text{ м}$.

По данным хронометражных наблюдений средняя часовая производительность гидроустановки по породе была равна $250\text{--}280 \text{ м}^3$ в плотном теле. Производительность установки по гидросмеси колебалась в значительных пределах и в среднем составляла $2100\text{--}2200 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало скорости потока в трубопроводе 3 м/с и объемной концентрации гидросмеси $C = 13 \%$.

Диаметр среднего куса дробленой породы изменялся от 7 до 50 мм, а содержание класса -3 мм в дробленой породе составляло от 10 до 30 %.

Наблюдения и исследования в промышленных условиях показали, что уклоны намывных полускальных пород зависят от крупности частиц и

удельного расхода воды. В промышленных условиях не представилось возможным длительное время выдерживать эти параметры постоянными и выявить влияние других факторов. Это определило необходимость проведения измерений на опытном участке, а затем и на специальном лабораторном стенде.

Опытный участок был подготовлен на дамбе гидроотвала "Новобачатский" и представлял собой площадку, спланированную бульдозером с уклоном в сторону гидроотвала 0,02, шириной в нижней части 40 м, длиной 65 м. Наблюдения проводились по семи профильным линиям, расходящимся веером от центра воронки выброса пульпы. С трех сторон участка была возведена дамба высотой 3–3,5 м. Породы укладывали в гидроотвал торцевым способом с применением сосредоточенного выпуска пульпы. Работы продолжались в течение четырех дней. Всего было намыто около 10 тыс. м³ породы.

Для детального изучения процесса отложения полускальных дробленых пород был использован метод моделирования намыва и создан специальный стенд. При одних и тех же параметрах осуществлялись три-четыре намыва. Исследования проводились с песчаником при крупности фракций 0–50 мм и различном содержании фракций менее 1 мм. Расход гидросмеси изменялся от 70 до 160 м³/ч, а ее концентрация — от 2 до 15 %.

Проведенные на опытном участке и гидроотвале экспериментальные исследования позволили выявить общую картину процесса надводного намыва дробленых полускальных пород при торцевом сосредоточенном выпуске гидросмеси из трубопровода. Установлено, что режим движения пульпы и формирование профиля поверхности отложений определяются концентрацией гидросмеси и гидродинамикой взаимодействия водного потока с транспортируемыми частицами (скоростью потока и крупностью частиц).

При обработке результатов исследований с целью получения уравнения для определения среднего уклона I поверхности отложений в качестве определяющих параметров были приняты весовая консистенция, средний диаметр частиц породы и расход гидросмеси. В результате обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость:

$$I = 0,37 \sqrt[3]{C_1}^{1/2} \sqrt{d^3 g / Q}, \quad (V.1)$$

где

$$C_1 = \gamma_T Q_T / (\gamma_0 Q_B),$$

Q_T , Q_B — объемный расход соответственно твердого вещества и воды; d — средний диаметр частиц, м; Q — расход гидросмеси; g — ускорение свободного падения; γ_T , γ_0 — плотность соответственно породы и воды, т/м³.

При перемещении руслового потока оседающая порода формирует профиль поверхности отложения, который имеет параболический вид (3) и хорошо описывается уравнением

$$y/H = k(1 - x/L)^n, \quad (V.2)$$

где H — высота намыва в месте выпуска гидросмеси, м; L — длина откоса

намыва, м; x, y — текущие координаты точки откоса намыва, м; k, n — коэффициенты пропорциональности.

Параболический характер профиля поверхности отложений связан с уменьшением уклона русла потока по мере оседания частиц и снижения концентрации гидросмеси по длине намыва. Из формулы (V.2) можно получить уравнение профиля поверхности отложений породы, выраженное через средний уклон:

$$y = kI_{\text{ср}}L \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n. \quad (\text{V.3})$$

Местный уклон поверхности отложений находится путем дифференцирования уравнения (V.3):

$$i = -knI_{\text{ср}} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{n-1}. \quad (\text{V.4})$$

Подставляя в уравнения (V.3) и (V.4) вместо $I_{\text{ср}}$ зависимость (V.1), можно выразить уравнение профиля поверхности отложений и местный уклон через параметры гидросмеси. Математическая обработка полученных данных показала, что коэффициенты в формуле (V.2) практически не зависят от параметров намыва и их средние значения при намыве крупнокусковых дробленых пород равны: $n = 1,33$; $k = 1,0$. Выполненные экспериментальные исследования и полученные на их базе расчетные зависимости (V.1) — (V.4) позволяют при намыве дробленых пород в гидроотвал определить интенсивность и высоту слоя намыва, количество породы, укладываемой с одного наращивания трубопровода, а также дают возможность выбрать для конкретных условий оптимальный способ намыва.

Освещение оборотной воды при укладке полускальных пород по данным натурных наблюдений на разрезе "Краснобродский" не вызывает затруднений ввиду хорошей водоотдачи этих пород. Наиболее рациональным является способ естественного освещения.

Перед началом намыва под углом к дамбе обвалования укладывался трубопровод на опорах высотой 4–4,5 м. Расстояние от оси дамбы до места выпуска гидросмеси из трубопровода составляло 15–20 м. При намыве образовался конус высотой 4–4,5 м.

При уменьшении концентрации и крупности твердой составляющей гидросмеси, а также при увеличении удельного расхода жидкости наблюдалось уменьшение уклона откоса отложений породы.

После намыва бульдозером параллельно дамбе создавалась промежуточная опорная призма из намывных коренных пород; высота ее от уровня намытого грунта при уклоне 5–10 % составила 30–50 см, а расстояние от центра конуса намыва принималось в среднем 5 м. Нарращивание участка трубопровода длиной 10 м осуществлялось бульдозером, соединение — с помощью быстроразъемных соединений или сваркой.

В процессе экспериментальных исследований оптимальная высота слоя намыва при уклоне 5–10 % составила 0,5–1,0 м, высота яруса — 4–4,5 м,

что позволило укладывать в гидроотвал с одного наращивания трубопровода 3,5–4,0 тыс. м³ породы и обеспечило непрерывную работу гидроотвала в течение двух рабочих смен.

Контроль состояния намывного основания на опытном участке около восточной дамбы гидроотвала "Новобачатский" выполнялся с использованием инструментальных наблюдений за осадками поверхности намывного массива полускальных пород, зондирования намывных суглинков и естественного основания и штанговыми пьезодинамометрами. Натурные исследования позволили установить степень уплотнения намывного слоя и через нее определить по данным лабораторных испытаний образцов на различных стадиях уплотнения, что сопротивление сдвигу намывных суглинков за период около 500 сут возросло под действием давления $q = 0,07 \pm 0,08$ МПа от полускальных пород на 15–20 %.

Упрочнение слабых грунтов посредством наложения пористого штампа из намывных песков широко применяется в практике промышленного и гражданского строительства. Уплотнение намывных меловых грунтов песчаной подушкой в бассейне КМА впервые осуществлено на гидроотвале "Симонова пасека" Стойленского карьера.

Промышленные эксперименты выполнялись с целью получения надежных исходных данных, необходимых для расчета основных технологических параметров ускоренной подготовки гидроотвалов карьеров КМА к рекультивации. Наличие различных по литологическому составу и геометрическим размерам действующих и законсервированных намывных сооружений позволило использовать некоторые из них в качестве натуральных моделей намыва и последующего взаимодействия материалов различной водопроницаемости.

Северная упорная призма гидроотвала "Березовый Лог" послужила натурной моделью послонного намыва породных масс различной водопроницаемости. Способ намыва призмы – безэстакадный, односторонний – обеспечил формирование мощного (высотой до 75 м и шириной до 500 м) массива песчаных, а также переслаивающихся песчаных и глинисто-меловых грунтов (см. рис. 41).

Главным условием качественного формирования упорных призм гидроотвалов посредством одностороннего намыва является достаточное количество песка в общем балансе вскрышных пород, обеспечивающее опережение намыва поверхности упорных призм над центральной зоной гидроотвала.

При общей отрицательной оценке практики, приведшей к образованию слабых глинисто-меловых прослоев в теле песчаной упорной призмы, следует отметить, что изучение изменений физико-механических свойств слагающих прослой грунтов позволило сделать важный вывод о высокой интенсивности их консолидации под влиянием вмещающих намывных песков. Контроль за развитием процесса консолидации глинисто-меловых линз осуществлялся с использованием сети пьезометров и пьезодинамометров. Установлено, что общее поровое давление в тонкодисперсных слоях примерно равно гидростатическому (т. е. фиксируемому пьезометрами). Таким образом, степень уплотнения глинисто-меловых линз под дей-

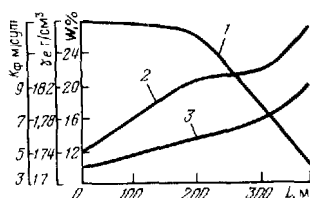


Рис. 44. Зависимости водно-физических свойств намывных песков $K_{\text{ф}}$ (1), γ_e (2) и W (3) от расстояния до выпуска гидросмеси

ствующими нагрузками близка к единице и соответствует реальной скорости намыва до 8 м/год.

В ходе натурных исследований на упорной призме гидроотвала "Березовый Лог" изучалось изменение водно-физических свойств намывных песков в зависимости от расстояния наблюдательных точек до места выпуска пульпы. При этом расход гидросмеси выдерживался примерно постоянным ($q_{\text{см}} = 0,8-1,1 \text{ м}^3/\text{с}$).

Геотехнический контроль осуществляли по всему периметру упорных призм путем поинтервального (через 1 м по вертикали) отбора образцов на поперечниках, расстояние между которыми составляет 125–150 м.

Установлен характер распределения показателей некоторых водно-физических свойств грунтов в пределах пляжной зоны. Суммарное число показателей по каждому виду определений изменялось от 552 до 1866. Статистической обработкой данных установлено, что показатели распределяются в основном по нормальному закону. При этом выявлена корреляционная связь значений коэффициента фильтрации $K_{\text{ф}}$, плотности γ_e и естественной влажности W с расстоянием от места выпуска гидросмеси L (рис. 44) и получены следующие уравнения регрессии, которые рекомендуются к использованию при прогнозной оценке режима фильтрации и устойчивости упорных призм гидроотвалов применительно к Старооскольскому железорудному району (по М.А. Дергилеву, Ю.Н. Дьячкову):

$$K_{\text{ф}} = 12,89 - 649 \cdot 10^{-5} L - 6 \cdot 10^{-5} L^2;$$

$$W = 9,49 + 198 \cdot 10^{-4} L + 99 \cdot 10^{-6} L^2 - 277 \cdot 10^{-9} L^3;$$

$$\gamma_e = 1,72 + 73 \cdot 10^{-5} L - 17 \cdot 10^{-8} L^2 - 236 \cdot 10^{-11} L^3,$$

где $K_{\text{ф}}$, W , γ_e , L — соответственно коэффициент фильтрации (м/сут), влажность (%), плотность при естественной влажности (г/см³) и расстояние от выпуска гидросмеси (м).

Установлено отсутствие корреляционной связи с расстоянием от места выпуска гидросмеси для таких показателей, как плотность сухого грунта и плотность для предельно рыхлого и плотного состояний.

Реальные уклоны намыва песчаных грунтов (средне- и мелкозернистых) составили 1:20÷1:50.

Анализ гранулометрического состава грунтов упорной призмы показал, что при одностороннем намыве песчано-меловых смесей (когда обеспечивается заданное техническими условиями превышение гребня упорной призмы над ядерной частью) в теле призмы преобладают сравнительно

крупные частицы. Мел в упорной призме в этом случае был представлен окатышами и крошкой ($d > 2$ мм). Мелкие частицы меловых пород выносятся за пределы упорной призмы. Результаты гранулометрического анализа намывтой песчано-меловой смеси на расстоянии до 50 м от выпуска свидетельствуют о том, что фракции 2–30 мм составляют 8,3–10,8 %; 0,1–2 мм – 89÷91,7 %; менее 0,1 мм – 3,9÷4,7 %.

На гидроотвале "Симонова пасека" Стойленского карьера опытным намывом песков на слой меловой пасты мощностью около 4 м было обеспечено существенное форсирование консолидации мелового слоя под действием пористого штампа мощностью до 5 м.

Представляет интерес искусственно созданная авария гидроотвала "Симонова пасека". В результате интенсивного снеготаяния в законсервированном гидроотвале скопилось более 600 тыс. м³ воды, которую из-за отсутствия водосбросных сооружений было решено направить в нижний бьеф по канаве, вырытой специально в правобережном примыкании. Поток воды, двигаясь по склону, сложенному глинистыми породами, переместился на намывной массив и размыл его до основания. Сформировавшиеся в результате размыва углы откосов имели занижения от 40–55° (в теле упорной призмы и промежуточной зоне) до 70–75° (в ядерной зоне).

Эффективность пригрузки слоя намывных суглинков мощностью $h = 4\div 6$ м и суглинков основания ($h = 6\div 8$ м) слоем песчаных пород ($h = 7\div 14$ м) была проверена в результате опытного намыва, выполненного в ходе пригрузки низового откоса северо-западной призмы гидроотвала "Березовый Лог" (район очистных сооружений). Объем намывных работ по устройству пористого штампа составил 155 тыс. м³. Контрольно-измерительная аппаратура состояла из сети пьезометров, реперов, стационарных датчиков – пьезодинамометров конструкции Гидропроекта.

Через три месяца после окончания намыва песка в зонах, прилегающих к точкам заложения стационарных датчиков, было выполнено комплексное зондирование, результаты которого вместе с показаниями стационарных датчиков и измеренными осадками свидетельствуют об интенсивном уплотнении намывных суглинков и суглинков основания [17].

Физико-механические свойства намывных грунтов в основании намыва песчаной пригрузки на северо-западном участке упорной призмы (по данным ВНОГЕМ) характеризуются следующими значениями

Естественная влажность, %	47,7
Плотность минеральных частиц, г/см ³	2,72
Плотность грунта, г/см ³	1,76
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,19
Пористость, %	50,3
Коэффициент пористости	1,29
Число пластичности	17,2

По числу пластичности пригруженные грунты относятся к глинам – тяжелым суглинкам.

Натурные наблюдения и опытно-промышленные работы на хвостохранилище "Грачев Лог" осуществлялись на трех участках. На участке № 1 был произведен опытный намыв, предусматривающий укладку слоя суглинков и последующую пригрузку этого слоя хвостами обогатительной фабрики. Для намыва был использован один из небольших оврагов, впадающих в балку Грачев Лог.

Выполнена проверка пригодности хвостов обогащения для использования их в качестве пористой пригрузки, необходимой для искусственного уплотнения разжиженных породных масс центральных зон гидроотвалов, сложенных тонкодисперсными слабопроницаемыми породами.

Овраг, имитирующий гидроотвал, был перекрыт земляной перемычкой, в теле которой был заложен коллектор водосбросного колодца. Гидротранспорт суглинков, а затем и хвостов осуществлялся гидроустановкой типа 12 Гр-8т + 14Д-6, выполняющей работу по пылеподавлению на хвостохранилище. До начала намыва в тальвеге оврага был снят гумусовый слой и установлены датчики порового и общего давления, а также реперы для замера вертикальных деформаций поверхности намыва.

Водно-физические свойства намывных суглинков приведены ниже.

Плотность минеральных частиц, г/см ³	2,68
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,51
Пористость, %	43,74
Коэффициент пористости	0,784
Коэффициент водонасыщения	0,98
Коэффициент фильтрации, м/сут.	0,0044

Гранулометрический состав намывных суглинков следующий.

Размер фракции, мм	<0,05	<0,002	<0,001	<0,001
Содержание, %	18,37	42,2	11,7	27,73

Водно-физические свойства хвостов обогащения приведены ниже.

Плотность минеральных частиц, г/см ³	2,98
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,6—1,95
Пористость, %	32—45
Коэффициент фильтрации, м/сут.	0,47—1,5

Усредненный гранулометрический состав следующий.

Размер фракции, мм . . .	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05
Содержание, %	7,5	9,5	28,5	33
Размер фракции, мм . . .	0,05—0,1	0,01—0,005	<0,005	
Содержание, %	17,5	2	2	

Установлено, что хвосты обогащения обладают водопроницаемостью, достаточной для использования их в качестве фильтрующей пригрузки ($K_f > 0,1$ м/сут).

На участке № 2 были организованы натурные наблюдения за характером формирования поверхностей намыва, а также изменением водно-физических свойств при фракционировании различных материалов хвостов обогащения, золошлаков ТЭЦ и лессовидных суглинков. Суглинки на хвостохранилище использовались для пылеподавления. Открытые надводные пляжи, представленные отложениями хвостов и золошлаков, для предотвращения ветровой эрозии периодически перекрывались тонкими (от 10 до 30 см) слоями глинистого материала. Уклоны поверхности намыва определялись посредством нивелировок и стереофотограмметрических съемок. Установлено, что уклоны намыва хвостов изменяются от 0,0068 до 0,0023 при изменении расстояния до выпуска пульпы соответственно от 0 до 500 м. Значения уклонов хвостов близки к значениям уклонов намыва суглинков, что значительно упрощает их послойную укладку.

Уклоны и фильтрационные свойства золошлаков Губкинской ТЭЦ близки к аналогичным характеристикам хвостов обогащения. Наличие же в золошлаках большого числа легких частиц упрощает их подачу на отдаленные участки отвалов, но осложняет осветление оборотной воды.

Водно-физические свойства хвостов определялись по образцам, отобраным через 50 м на двух профилях. Максимальное удаление точек отбора проб от места выпуска достигало 500 м. Установлены некоторые закономерности изменения гранулометрического состава хвостов при фракционировании на пляже намыва. Содержание фракции 0,5–0,25 мм в пробах убывало от 43,67 (в зоне 15–50 м от места выпуска) до 5,12 % на расстоянии 200 м от выпуска. Далее количество этой фракции резко снижалось до 0,1–0,3 % на расстоянии 500 м от места выпуска пульпы. Содержание фракции 0,25–0,1 мм при изменении расстояния до места выпуска от 10 до 200 м соответственно возрастало от 32,3 до 59,9 %, после чего резко падало до 2,2 % при увеличении расстояния до 500 м.

В зависимости от местоположения точек отбора водно-физические свойства хвостов изменяются следующим образом. Влажность увеличивается при приближении к прудку от 4,97 до 31 %. Плотность намывного материала возрастает от 1,58 до 2,01 г/см³. Значения плотности сухого материала изменяются от 1,36 до 1,62 г/см³ без выявленной закономерности. Величина плотности минеральных частиц в интервале расстояний 7–47 м несколько выше (2,86–3 г/см³), чем на всем остальном отрезке профиля (2,83–2,86 г/см³).

Значения коэффициента фильтрации уменьшаются от 3,39 до 0,12 м/сут. Фильтрационные свойства хвостов в среднем более, чем на два порядка выше коэффициента фильтрации глинисто-меловых пород, что позволяет использовать их в качестве пригрузочного материала.

На участке № 3 посредством одностороннего намыва формировалась разделительная (отсечная) дамба из хвостов обогащения. Создание разделительных дамб диктуется необходимостью ускорения рекультивации территорий хвостохранилищ посредством поэтапного заполнения отдельных его секций (отсеков), а также задачами сокращения фильтрационных

потерь. Формирование дамб из хвостов позволяет значительно снизить затраты на их возведение.

Опытными работами на участке № 3 установлено, что хвосты обогащения фабрик комбината "КМАруда" (средневзвешенный диаметр частиц 0,045—0,075 мм) пригодны для намыва дамб и упорных призм. Безопасное передвижение гусеничных машин ($P \geq 0,15$ МПа по поверхности намывных хвостов возможно при условии обеспечения превышения отметок намыва над уровнем воды в прудке-осветлителе не менее 0,8 м. Серьезным препятствием при намыве дамб из хвостов обогащения является интенсивная ветровая эрозия (силикозоопасное пыление) поверхности намывных сооружений (особенно дамб рабочего обвалования). В качестве способа намыва дамб из хвостов обогащения, обеспечивающего пылеподавление, может быть рекомендован способ, примененный на опытном участке.

Во избежание пыления дамбы рабочего обвалования на этом участке отсыпались из суглинков, доставляемых с берегов хвостохранилища бульдозерами и скреперами. Расстояние транспортирования суглинков не превышало 200 м. Ширина дамб по верху (около 4 м) обеспечивала проезд машин вдоль рабочего пульповода. Высота (около 2 м) определялась годовым ростом отметок заполнения хвостохранилища. Откосы дамб формировались произвольно, к плотности отсыпки специальных требований не предъявлялось.

Пыление пляжа намыва предупреждалось следующими мерами: хвостовая пульпа растекалась из выпусков, равномерно рассредоточенных по длине рабочего пульповода, что обеспечивало постоянное смачивание пляжа. После достижения заданных отметок на поверхность намыва наносился слой суглинков ($h = 10 \div 30$ см) путем подачи по рабочему пульповоду суглинистой пульпы. Через 1,5—2 мес после прекращения намыва суглинков поверхность пляжа зарастала травой.

На строительстве Нововоронежской АЭС р. Дон была направлена по каналу спрямления, а старое русло замыто и рекультивировано. Грунты, предназначенные для замыва русла, отличались большим содержанием мелких фракций, что привело к образованию на отдельных участках замыва мощных (до 6 м) слоев илистых отложений. Для придания вновь образованной территории несущей способности, достаточной для передвижения машин, неконсолидированные отложения были перекрыты песчаными грунтами путем ряда параллельных переывов русла в поперечном направлении пионерно-торцевым способом.

Безопасность работ в условиях осадок намывной поверхности обеспечивалась замедлением подвигания торца намывного пульповода и непродолжительными (2—3 ч) остановками в работе. Таким образом, неконсолидированная толща оказалась расчлененной рядом параллельных песчаных призм. Слабые грунты, выдавленные при намыве в боковых направлениях, затем были перекрыты песчаными. Проведенные промышленные эксперименты позволили перейти к внедрению новой технологии формирования крупных гидроотвалов, в которых осуществляется совместное складирование материалов различной водопроницаемости.

В.З. ФОРМИРОВАНИЕ ДРЕНАЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВНУТРЕННИХ ЗОНАХ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

Московским горным институтом, трестом "Гидромеханизация" Минэнерго СССР и Украинским отделением Гидропроекта предложен способ возведения намывного основания, (А.С. № 663777), отличительной чертой которого является расчленение толщи тонкодисперсных грунтов системой гидравлически связанных намывных фильтрующих элементов — призм, линз и подушек, ускоряющих процесс уплотнения слабоводопроницаемых грунтов (рис. 45, а). Способ внедрен впервые на гидроотвале "Березовый Лог", при подготовке которого и рекультивации намыто около 18 млн. м³ фильтрующих материалов. Укладка фильтрующих материалов осуществлялась путем безэстакадного пионерно-торцевого намыва (рис. 45, б). В качестве фильтрующих материалов на этом гидроотвале использовались пески, отходы обогащения железистых кварцитов, золошлаки ТЭЦ.

Широкомасштабному внедрению разработанной технологии предшествовала ее опытно-промышленная проверка непосредственно в условиях гидроотвала "Березовый Лог", где осуществлялось перекрытие песчаной призмой ядерной зоны мощностью свыше 45 м, сложенной глинисто-меловыми грунтами (см. рис. 29). Объем опытных намывных работ по укладке песка в ядерную зону составил 750 тыс. м³. Геометрические параметры призмы: длина — 500 м, ширина — 70 м, максимальное превышение над поверхностью ядерной зоны — 3 м; проникновение песчаных грунтов в неконсолидированную толщу — до 22,5 м.

Намыву плавающей дренажной призмы предшествовало зондирование глинисто-меловых пород со льда с помощью комбинированного зонда,

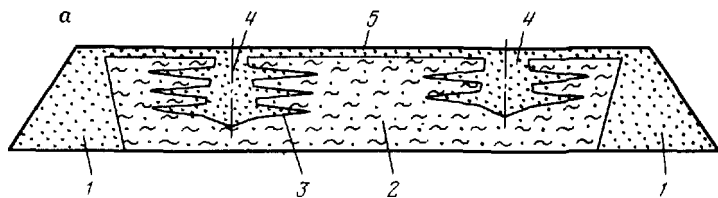
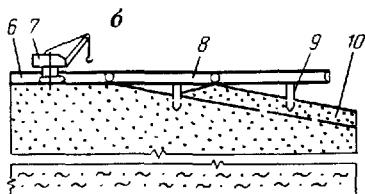


Рис. 45. Конструкция намывного основания (а) и схема намыва фильтрующего материала (б):

1 — упорные призмы; 2 — намывной массив тонкодисперсных грунтов; 3 — линзообразные прослойки из фильтрующего материала; 4 — "плавающее ядро" дренажной призмы; 5 — покровный слой из фильтрующего грунта; 6 — пульповод; 7 — кран для наращивания пульповода; 8 — концевой участок пульповода; 9 — свайные опоры; 10 — зона наибольших осадок намывной поверхности



включающего прибор вращательного среза и датчик для измерения порового давления. Данные зондирования позволили установить зависимость между мощностью слоя намыва песка, несущей способностью глинисто-меловых пород и скоростью наращивания пульповодов.

При намыве по пионерно-торцевой схеме наращивание пульповода осуществлялось трубами длиной 30 м с помощью крана и бульдозера.

Концевой участок намывного пульповода, работающий в зоне наибольших осадок намывной поверхности, монтировался на свайных опорах с применением шаровых шарниров. Длина этого участка (количество звеньев инвентарных труб) устанавливалось в зависимости от мощности и несущей способности неконсолидированной толщи. В процессе намыва на дренажной призме через 100 м устанавливались реперы для контроля за ее осадками. В ходе намыва фиксировалось выдавливание глинисто-меловых пород в боковых и торцевой зонах призмы. Намыв сопровождался осадками поверхности, имеющими различный по интенсивности характер. Вновь формирующаяся при намыве песчаная пригрузка вызывала образование ряда видимых циркообразных террас с уклоном в сторону движения пульпы.

В отличие от весьма динамичного характера осадок конуса намыва осадки сформировавшейся призмы имели спокойный характер и фиксировались лишь инструментально.

Необычными деформациями отмечался намыв дренажной призмы в зимний период при подаче песчаной пульпы на мерзлый слой, придающий поверхности неконсолидированной толщи временную, однако достаточно высокую несущую способность. В летний период продвижение конуса намыва сопровождалось более или менее упорядоченными осадками, что создавало условия для формирования призмы из однородного материала без перемешивания с глинисто-меловыми породами. В зимний период накопление значительных масс песка на корке мерзлого грунта с последующим внезапным ее разрушением сопровождалось защемлением некоторой части тонкодисперсных грунтов и прорывом их сквозь слой песка на поверхность по периферии конуса с образованием своеобразных грифонов, которые действовали, не замерзая, в течение трех месяцев после окончания намыва. Температура воздуха в этот период достигала $-20 \dots -25^{\circ}\text{C}$.

Пьезодинамометрами конструкции Гидропроекта, установленными в неконсолидированной толще под призмой и сбоку от нее, фиксировалось наличие и последующее рассеивание избыточного давления воды в порах грунта. Повторный намыв призмы сопровождался новым ростом и последующим снижением избыточного давления.

Безопасность работ по намыву плавающей дренажной призмы обеспечивалась строгой регламентацией действий обслуживающего персонала.

Специальной инструкцией в качестве основной меры безопасности предусматривалось расположение людей и оборудования вне зоны интенсивных деформаций.

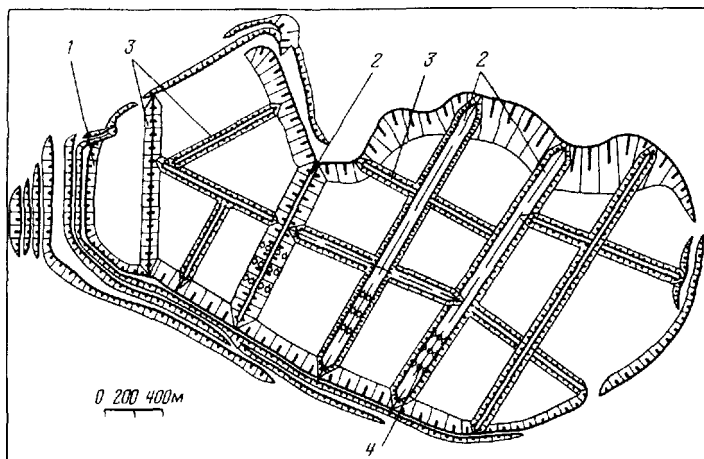


Рис. 46. Схема расположения дренажных призм на гидроотвале "Березовый Лог": 1 — откосные сооружения гидроотвала; 2 — разделительные дренажные призмы; 3 — отсечные дренажные призмы; 4 — створы реперов

План размещения дренажных элементов в пределах намывного массива гидроотвала показан на рис. 46. Реализация предложенной технологии базировалась на результатах инженерно-геологического районирования территории гидроотвала (см. рис. 37 и табл. 18). Оси дренажных призм, разделяющих ядерную зону на секции, приурочены к границам инженерно-геологических участков и подучастков. С учетом установленной зондированием и прогнозными расчетами необходимости форсирования консолидации глинисто-меловых грунтов в центральной части второй секции (на границе подучастков III-а и III-б) по рекомендации МГИ сооружена дренажная призма № 3. Дренажные призмы — основные связующие элементы дренажной системы — предназначены для размещения на них оборудования и пульпопроводов, необходимых для перекрытия фильтрующими подушками, суглинками и черноземом карт рекультивации. Между дренажными призмами, примыкающими к песчаной ограждающей дамбе, намывались отсечные призмы, оконтуривающие карты рекультивации.

Расчетами уплотнения и несущей способности намывного массива определена продолжительность периодов "пассивного" t_0^p (без применения специальной технологии намыва) и "активного" t_0^a "отдыха" гидроотвала. При обосновании режима возведения дренажных призм максимальная скорость продвижения торца намывного пульповода $v_{т.п}$ определялась по условию обеспечения несущей способности слоя мощностью h_p в подошве призмы, погруженной в тонкодисперсные грунты. Величина h_p определяется глубиной залегания нижней границы области предельного состояния тонкодисперсных грунтов [см. формулу (III.14)]. На рис. 47 представлены зависимости t_0 и $v_{т.п}$ от мощности ядерной зоны h_n для

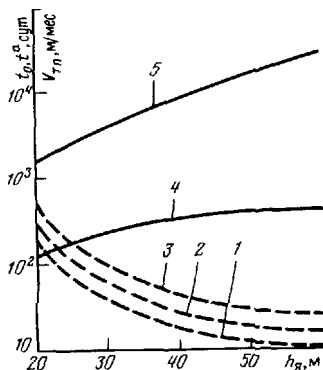


Рис. 47. Зависимости $v_{T,П}$ (1, 2, 3 – соответственно при скорости намыва $v_n = 2; 4; 8$ м/год), t_0^I (4 – при $v_n = 4$ м/год), t_0^{II} (5 – при $v_n = 4$ м/год) от мощности ядерной зоны из глинисто-меловых грунтов

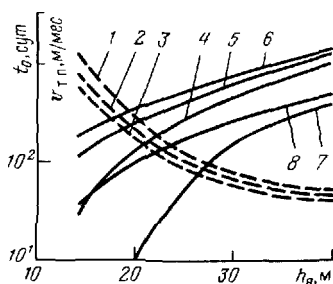


Рис. 48. Зависимости $v_{T,П}$ (1, 2, 3 – соответственно при $v_n = 2; 4; 8$ м/год), t_0^I (4, 5, 6 – соответственно при $v_n = 2; 4; 8$ м/год) и t_0^{II} (7, 8 – соответственно при $v_n = 4; 8$ м/год) от мощности ядерной зоны из меловых грунтов

второй секции гидроотвала. Возведение намывного основания позволило завершить подготовку к рекультивации первой и второй секций гидроотвала общей площадью около 500 га.

Для "пассивного отдыха" намывного массива потребовалось бы свыше 30 лет.

Для обеспечения необходимого темпа перекрытия ядерной зоны ($v_{T,П} = 30$ м/мес) на участках с низкими прочностными характеристиками и сдачи второй секции для дальнейшего использования осуществлено целенаправленное ускорение консолидации намывных масс путем подачи в ядерную зону фильтрующих материалов. Определены объемы фильтрующих материалов (с учетом их реального баланса), требующиеся для ускорения уплотнения глинисто-меловых пород второй и третьей секций. Для предупреждения эрозионных процессов на восстановленной территории отметки заполнения гидроотвала уточнены с учетом развития осадок намывного массива. Разработанные рекомендации по управлению процессами консолидации глинисто-меловых пород и контролю состояния намывного массива использованы Укргидропроектом и проектной конторой треста "Гидромеханизация" Минзнерго СССР при выполнении технического проекта гидроотвала "Березовый Лог" и технорабочего проекта его рекультивации.

Прогноз и контроль уплотнения тонкодисперсных грунтов в пределах различных участков ядерной зоны с учетом влияния дренарующих элементов позволили выполнить корректировку объема гидроотвала и обосновать увеличение его общей вместимости до 250 млн. м³. Для предупреждения эрозионных процессов на восстановленной территории отметки заполнения гидроотвала уточнены с учетом развития осадок намывного массива (см. рис. 29).

Для форсирования консолидации наименее уплотненного тонкодисперсного материала грейферной секции предложено использовать в качестве пористого штампа отходы рудообогащения комбината "КМАруда", для чего необходимо выполнить наращивание дренажной призмы № 2 на 10–12 м. Укладка хвостов обогащения в третьей секции оказала интенсивное уплотняющее воздействие на тонкодисперсные грунты. Рекультивация поверхности хвостохранилища в третьей секции не исключает дальнейшего использования складываемых отходов обогащения при совершенствовании техники и технологии их переработки. Реализация этого мероприятия отвечает действующим требованиям к охране недр и окружающей среды.

Формирование дренажной призмы осуществляется также в толще меловых намывных грунтов на гидроотвале Лебединского ГОКа в балке Чуфичева. Границы зон гидроотвала и проектное положение дренажных призм (см. рис. 33) уточнялись с использованием данных выполненной ВИОГЕМОм аэрофотосъемки. На рис. 48 представлены графики $t_0 = f(h_{\text{я}})$ и $v_{\text{т.п}} = f(h_{\text{я}})$ для сложенной меловыми грунтами ядерной зоны гидроотвала в балке Чуфичева.

Технология создания системы намывных дренажных элементов во внутренних зонах гидроотвалов, сложенных тонкодисперсными грунтами, обеспечивает ускорение водооборота за счет форсирования консолидации намывных массивов. Благодаря наличию сети дренажных элементов, создаваемых с использованием песка, золошлаков ТЭЦ, отходов обогащения и других фильтрующих материалов, значительно сокращаются пути фильтрации поровой воды в слабоводопроницаемых намывных толщах. В приоткосной и промежуточной зонах вода отжимается к дренажным элементам и затем через откосные сооружения поступает во внешние дренажные каналы и пруды-аккумуляторы. В ядерной (прудковой) зоне формирование дренажных элементов обеспечивает ускоренное поступление воды к шандорным колодцам. Объем воды V_w , отжимаемой из пор слоев тонкодисперсных грунтов, определяется через уменьшение их пористости в ходе уплотнения под действием дренажных элементов:

$$V_w = \Delta n V = (n_0 - n_k) V,$$

где V — общий объем тонкодисперсных грунтов, м^3 ; n_0 — начальная пористость; n_k — пористость на расчетный момент.

Характеристики пористости определяются из соотношений:

$$n_0 = \frac{\epsilon_0}{1 + \epsilon_0}; \quad \epsilon_0 = \frac{(1 + W) \Delta}{\gamma} - 1;$$

$$n_k = \frac{\epsilon_k}{1 + \epsilon_k}; \quad \epsilon_k \cong \epsilon_0 - \frac{S(t)}{h} (1 + \epsilon_0),$$

где ϵ_0 — начальный коэффициент пористости (для неуплотненного грунта); W — влажность, доли ед.; Δ и γ — плотность соответственно минеральных частиц и тонкодисперсного грунта, т/м^3 ; $S(t)$ — осадка слоя на рас-

четный момент t (определяется с использованием зависимостей, приведенных на рис. 10–14).

Создание системы дренажных элементов во внутренних зонах гидротвалов способствует улучшению водооборота и позволяет сократить затраты на подпитку гидроустановок свежей водой в объемах, измеряющихся миллионами кубометров. Поэтому применение специальной технологии формирования гидротвалов имеет также большое значение с позиций охраны водных ресурсов горнопромышленных районов.

Для ряда гидротвалов разрезов Кузбасса форсирование консолидации намывных тонкодисперсных толщ возможно путем целенаправленной укладки гидравлическим способом отходов обогащения угля в круто-наклонных сепараторах.

Углеобогажительные установки типа КНС-108 и КНС-54 смонтированы в районе гидротвала "Прямой Ускат" для обогащения угля, доставляемого железнодорожным транспортом из разрезов "Новосергеевский" и "Краснобродский" и около гидротвала "Бековский" разреза им. 50-летия Октября. При общем годовом объеме переработки разубоженных углей марки 00 1200 тыс. т выход отходов достигает 720–770 тыс. т/год. Усредненный гранулометрический состав отходов углеобогащения характеризуется следующим содержанием фракций: 0–3 мм – 10%; 3–25 мм – 50%; 25–50 мм – 20%; > 50 мм – 20%. Съемками поверхности намыва отходов углеобогащения установлено, что уклоны намыва этих материалов изменяются в пределах $1:25 \div 1:15$. Оценка фильтрационных свойств отходов произведена для наиболее тонкой фракции < 5 мм. Установлено, что при изменении уплотняющего давления $q = 0-0,4$ МПа коэффициент фильтрации варьирует в пределах $K_f = 0,25-0,1$ м/сут. Плотность общей массы отходов составляет около $1,8$ т/м³. Полученные минимальные значения коэффициента фильтрации позволяют рассматривать отходы углеобогащения в качестве фильтрующего материала.

Проектное положение дренажных призм на гидротвале "Бековский" разреза им. 50-летия Октября показано на рис. 40. Оси дренажных призм приурочены к границам инженерно-геологических участков, выделяемых в пределах внутренних зон гидротвала. Принципиальная схема формирования дренажной призмы и ее поперечный разрез представлены на рис. 49. Отходы углеобогащения могут также использоваться для создания намывных упорных призм. Общая схема возведения дамб обвалования из намывных отходов углеобогащения показана на рис. 50.

Зависимости к определению продолжительности периодов "отдыха" t_0 и скорости подвигания призмы $v_{т.п}$ в тонкодисперсных толщах гидротвалов Кузбасса представлены на рис. 51, 52.

Максимальная продолжительность периодов с момента окончания намыва гидротвалов до начала работ и последующего эффективного использования намывных территорий (периоды "отдыха") без проведения мероприятий по форсированию консолидации массивов тонкодисперсных грунтов мощностью до 50 м для пляжных и ядерных зон достигает соответственно 10 и 20–25 лет. Предложенная технология формирования дре-

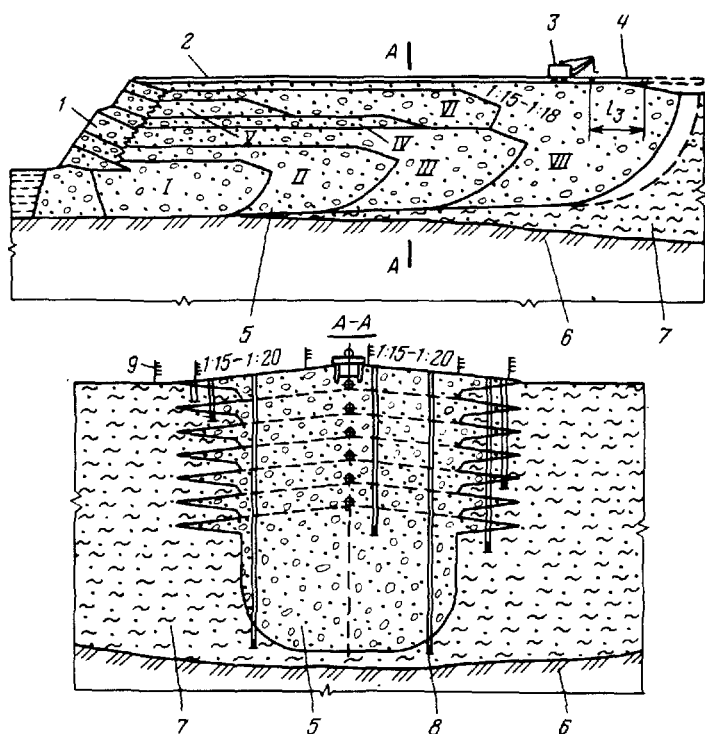


Рис. 49. Принципиальная схема формирования дренажной призмы из отходов углеобогащения:

I-VII - этапы формирования призмы; 1 - дамба гидроствала; 2 - пульповод; 3 - подъемный кран; 4 - звено пульповода длиной l_3 ; 5 - отходы углеобогащения; 6 - основание; 7 - намывные глинистые грунты; 8 - пьезодинамометры; 9 - реперы

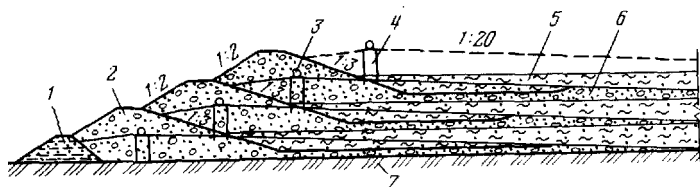


Рис. 50. Схема возведения дамб обвалования из отходов обогащения:

1 - дамба первичного обвалования из суглинка; 2 - дамба наращивания из отходов углеобогащения; 3 - рабочий пульповод; 4 - эстакада; 5 - намывные глинистые грунты; 6 - дренажная линза; 7 - основание

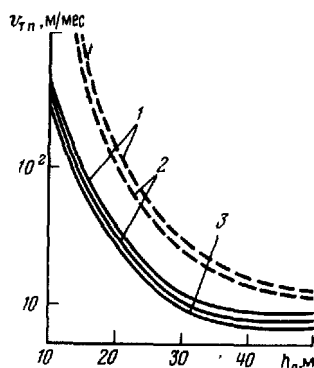
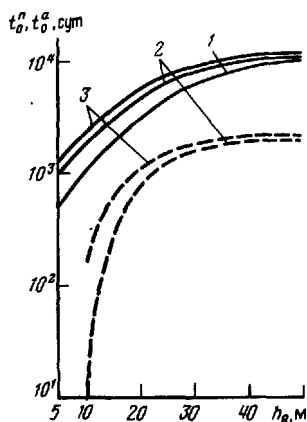


Рис. 51. Зависимости t_0^a (сплошные) и t_0^a, cum (пунктирные) от h_n для намывных массивов глинистых грунтов ядерных зон (Кузбасс):

1, 2, 3 — соответственно при $v_n = 1$; 2; 4 м/год

Рис. 52. Зависимости $v_{т.п}$ от h_n для пляжных (пунктирные) и идерных (сплошные) зон гидроотвалов Кузбасса:

1, 2, 3 — соответственно при $v_n = 1$; 2; 4 м/год

нажных элементов обеспечивает повышение объема складированной гидро-вскрыши на 10–15 % и сокращение продолжительности "отдыха" различных зон гидроотвалов до 1–5 лет (см. рис. 47, 48, 51).

Плотность сети дренажных элементов устанавливается с учетом направления дальнейшего использования территорий гидроотвалов: для размещения сухих отвалов создаются лишь разделительные дренажные призмы, служащие опорными полосами для перемещения транспортного и отвального оборудования; при подготовке гидроотвала к рекультивации — разделительные и отсечные призмы, фильтрующие подушки. Отметки заполнения гидроотвала принимаются с учетом установленных остаточных осадок намывного массива, т. е. формы и размеров мульды оседания, образующейся при уплотнении тонкодисперсных грунтов под действием их собственной массы и дополнительных внешних нагрузок от дренажных элементов и отвальных насыпей. Формирование выпуклой поверхности гидроотвала позволяет исключить развитие эрозийных процессов после завершения рекультивационных работ.

Перспективными объектами для применения новой природоохранной технологии формирования намывных массивов являются гидроотвалы действующего Михайловского и проектируемого Чернянского горно-обогатительных комбинатов КМА. Применительно к этим объектам МГИ совместно с проектной конторой "Гидромехпроект" разработаны проектные решения, реализация которых обеспечивает повышение вместимости сооружений и ускоренный ввод их территорий для последующего народнохозяйственного использования.

Действующий гидроотвал Михайловского ГОКа в логе Шамаровский предназначен для складирования четвертичных отложений северной части карьерного поля и имеет проектный объем 18 млн. м³. Создание в пределах намывного массива тонкодисперсных пород дренажных призм общим объемом около 1 млн. м³ из хвостов обогащения позволит увеличить объем гидроотвала примерно на 3 млн. м³. Формирование дренажной призмы из отходов обогащения не исключает возможности последующей выемки хвостов из тела гидроотвала для их дальнейшей переработки (например, с помощью земснаряда). Наряду с увеличением вместимости обеспечивается беспрепятственное использование территории гидроотвала практически одновременно с окончанием его намыва.

С учетом расширения объемов гидровскрыши на перспективу до 5—6 млн. м³/год рассмотрен вопрос формирования нового гидроотвала на территории отвала № 5 в пределах выделенного земельного отвода на участке урочища Гнань площадью около 150 га. В качестве северного борта гидроотвала используется сложенный глинистыми грунтами нижний уступ конвейерного отвала. На восточном фланге этого уступа к нему примыкает ограждающая дамба (упорная призма), для создания которой требуется около 3 млн. м³ песка. При переносе оси дамбы на участке ее примыкания к сухому отвалу на 100—150 м в восточном направлении за счет незначительного расширения земельного отвода можно уменьшить расход песка и увеличить объем гидроотвала. Для форсирования консолидации глинистых грунтов предлагается создать дренажную призму с двумя ответвлениями. Общий объем дренажных элементов составляет около 2 млн. м³. По предварительным оценкам объем гидроотвала без учета уплотнения тонкодисперсных масс под действием дренажных элементов и выпуклой поверхности гидроотвала (для компенсации осадок после завершения намыва сооружения) составляет около 20 млн. м³. Реализация рассмотренных проектных решений обеспечит возможность складирования в гидроотвале не менее 25 млн. м³ вскрышных пород и соответственно расширения сферы использования гидромеханизации в рабочей зоне карьера МГОКа.

Создание гидроотвала при формировании в массиве тонкодисперсных грунтов дренажных элементов в балке Гнань обеспечивает возможность беспрепятственного последующего размещения на его территории конвейерного отвала № 5.

Таким образом, обеспечивается полное использование территории земельного отвода отвала № 5 и исключаются деформации отвальных откосов.

По данным прогнозных расчетов, максимальные остаточные осадки тела гидроотвала составят около 1,2 м при мощности ядерной зоны $h_{\text{я}}$ до 30 м. Расчеты уплотнения намывных глинистых грунтов под дренажной призмой ($h_{\text{я}}' = 20$ м) и под песчаной подушкой ($h_{\text{я}}' = 14$ м) выполнялись путем решения задач фильтрационной консолидации и совместного решения, описывающего первичную и вторичную (за счет ползучести минерального скелета) стадии консолидации. Установлено существенное увеличе-

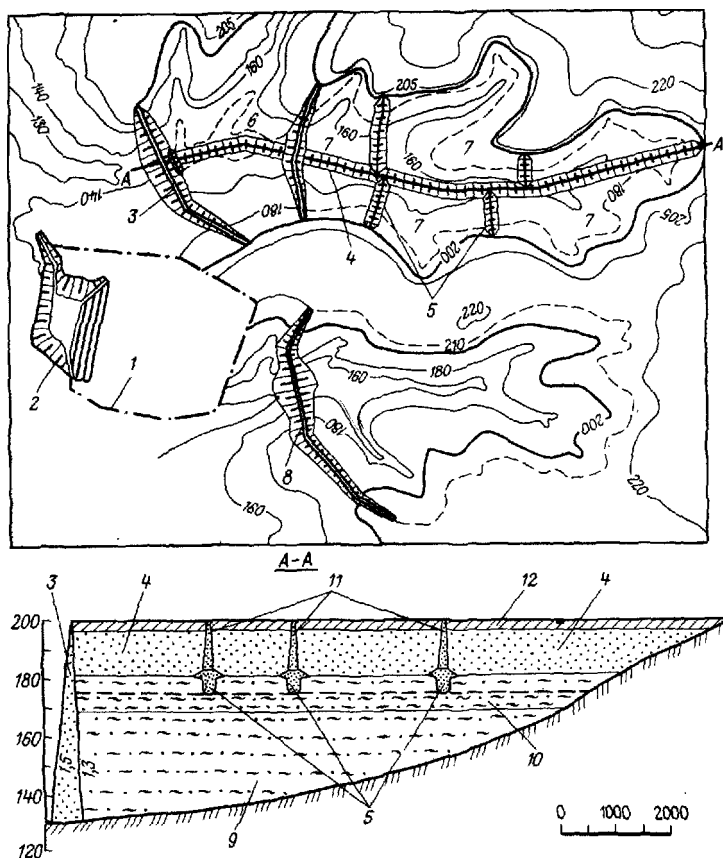


Рис. 53. Схема расположения гидроотвального и хвостового хозяйства Чернянского ГОКа:

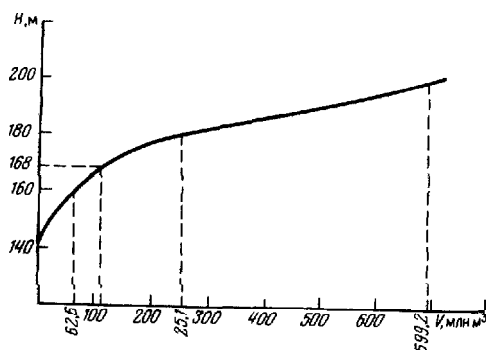
1 – проектный контур карьера; 2 – контур карьера на начало эксплуатации; 3 – ограждающая дамба совмещенной емкости гидроотвала и хвостохранилища; 4 – главная дренажная призма; 5 – разделительные дренажные призмы; 6 – аварийная емкость; 7 – рабочие емкости хвостохранилища; 8 – дамба гидроотвала в логе Стригун; 9, 10 – глинисто-меловые намывные грунты соответственно для периодов строительства и эксплуатации; 11 – разделительная дамба хвостохранилища; 12 – рекультивационный слой

ние сроков стабилизации осадков Δt при учете ползучести:

при $h'_x = 20$ м $\Delta t = 7$ лет; при $h'_x = 14$ м $\Delta t = 5$ лет.

Разработанная для условий Чернянского ГОКа схема предусматривает складирование горнокапитальной вскрыши в объеме 112 млн. м³, эксплуатационной вскрыши в объеме 150 млн. м³ и более 300 млн. м³ хвостов обогащения в совмещенную емкость гидроотвала и хвостохранилища в логе Окуневский (рис. 53, 54).

Рис. 54. Зависимость высоты намываемого сооружения — отметки заполнения (Черьянский ГОК) — от объема укладываемого материала



В подготовительный год создается специальный карьер для добычи песка, который используется для намыва ограждающей дамбы хвостохранилища, и осуществляется проходка разрезной траншеи железорудного карьера.

В календарные годы капитального строительства производится намыв ограждающей дамбы и отсечной дамбы отстойника (сначала из специального карьера, а затем из песков вскрыши карьера ЧГОКа) и укладка тонкодисперсных гидровскрышных пород в ложе совмещенной емкости.

В период разработки эксплуатационной вскрыши гидромеханизированным способом тонкодисперсные грунты в объеме 150 млн. m^3 также по прежней схеме укладываются в указанную емкость, а из песчаных пород намывается ограждающая дамба гидроотвала "Стригун". За два года до начала складирования хвостов обогащения укладка тонкодисперсных вскрышных пород перемещается в гидроотвал "Стригун", а в действующем гидроотвале производится намыв дренажной призмы и разделительных призм. На дренажной и разделительных "плавающих" призмах возводятся разделительные дамбы, делящие емкость хвостохранилища на секции: аварийную, для укладки хвостов самотеком и рабочую.

Укладка хвостов производится в наиболее отдаленной секции в верховьях балки от центра хвостохранилища с дренажной призмы, что обеспечивает оттеснение прудка к естественным отметкам с целью снижения пыления. По мере заполнения одной секции укладка хвостов перемещается в другую, а в первой с целью консервации и полного пылеподавления на хвосты укладываются потенциально плодородные вскрышные породы (суглиники).

Ниже приводятся преимущества новой схемы объединенного гидроотвально-хвостового хозяйства Черьянского ГОКа.

1. Сокращение срока строительства карьера с 7 до 5–5,5 лет (без увеличения энергоемкости оборудования и числа трудящихся).

2. Уменьшение фильтрационных потерь и загрязнения грунтовых вод от укладки хвостов при кольматации ложа хвостохранилища глинистыми грунтами. Получение дополнительного объема воды за счет фильтрационной консолидации тонкодисперсных грунтов гидровскрыши.

3. Увеличение вместимости сооружения за счет уплотнения уложенной гидровскрыши под действием нагрузки от вышележащих хвостов.

4. Снижение запыленности района за счет укладки хвостов от центра хвостохранилища с дренажной призмы и образования водной поверхности по периметру.

5. Обеспечение ускоренной поэтапной сдачи земель для нужд народного хозяйства.

Применение новой технологии возведения гидроотвалов перспективно также и для намывных объектов проектируемого Талдинского угольного разреза в Кузбассе (генпроектировщик — Сибгипрошахт). Общий объем рыхлой вскрыши в пределах карьерного поля составляет 350 млн. м³. В соответствии с календарным планом горных работ выемка наносов должна осуществляться в первые годы. Так, например, при разработке участков "Западный-73" и "Западный-86" наносы в объеме 80–90 млн. м³ должны быть отработаны в первые 10–15 лет. Укладка наносов экскаваторами во внутренних отвалах приведет к существенному ухудшению их устойчивости, так как при дальнейшем наращивании отвалов глинистые грунты будут нагружаться полускальными породами. В этих условиях целесообразно разрабатывать наносы средствами гидромеханизации с размещением гидроотвала в заболоченной пойме р. Тагарыш, которая берет начало в пределах карьерного поля. Минимальное расстояние от карьера до гидроотвала — около 0,5 км. В гидроотвале первой очереди может быть уложено около 120 млн. м³ глинистых грунтов на площади около 600 га. Максимальная мощность намывного массива при этом достигает около 50 м. По предварительным оценкам стоимость разработки 1 м³ наносов составит до 0,5 руб.

Создание дренажных элементов в намывной толще тонкодисперсных грунтов позволит увеличить полезный объем гидроотвала на 10–15 % и ускоренно подготовить для последующего сельскохозяйственного использования дополнительные (по отношению к имеющимся в настоящее время) площади.

Реализация в проекте строительства разреза "Талдинский" предложений МГИ по формированию внутренних отвалов полускальных пород и гидроотвалов глинистых грунтов обеспечивает достижение значительного экономического и природоохранного эффекта.

В.4. ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРООТВАЛООБРАЗОВАНИЯ

Экономическая эффективность гидромеханизации на карьерах, а также возможность использования территорий, мало пригодных для сельскохозяйственной деятельности и промышленного строительства, связана с рядом специальных вопросов [32, 35, 36, 37], решение которых следует начать с установления рациональных пределов заполнения гидроотвала. Естественно, что в первую очередь заполняются территории, наибо-

лее близко расположенные от карьера, что определяет наибольшую экономию по транспортным затратам. Как правило, с ростом высоты дамбы затраты на гидроотвалообразование увеличиваются, и на некоторой стадии необходимо решать вопрос о переходе на заполнение территории, расположенной на большем расстоянии от контуров карьера. Кроме транспортных затрат, при выборе первоначального и последующих положений гидроотвалов необходимо также учитывать ценность отчуждаемых земель и затраты на подготовку земли к горным работам. В общем виде условие перехода к новой территории гидроотвала может быть выражено таким образом:

$$C_2 \leq C_1 + \Delta C_{\text{тр.г}}, \quad (V.5)$$

где C_1 и C_2 — приведенные затраты на гидроотвалообразование, с учетом ценности площади соответственно для действующего и нового гидроотвала; $\Delta C_{\text{тр.г}}$ — разность в затратах на гидроотвалообразование для действующего и нового гидроотвала, определяемая дальностью транспортировки и геодезическими отметками.

При определении возможности дополнительной укладки определенного объема пород с применением колесного транспорта физическим ограничением является несущая способность намытой территории.

Экономическим ограничением для укладки пород сухих отвалов является увеличение дальности их транспортирования на намытую территорию при экономии затрат на отчуждение и подготовку территории для их укладки обычным способом.

С учетом обеспечения безопасности работ условием рационального размещения отвальных насыпей на намытых территориях будет:

$$C_{\text{тр.г}} - C_{\text{зем}} \leq C_{\text{тр.с.о}}, \quad (V.6)$$

где $C_{\text{тр.г}}$ — затраты на транспортирование и укладку пород сухих отвалов на намытую территорию; $C_{\text{зем}}$ — затраты, которые понадобились бы на отчуждение и подготовку специальной территории для отвальных насыпей; $C_{\text{тр.с.о}}$ — затраты на транспортирование и укладку пород на специально отведенной территории.

Ориентировочная оценка этого условия позволяет сделать вывод, что к пригодным для укладки сухих отвалов намытым территориям относятся расположенные близ карьера гидроотвалы.

Важным вопросом является также определение целесообразности проведения каких-либо мероприятий по форсированию консолидации намытых в гидроотвал пород с целью ускорения передачи территорий для использования в сельском хозяйстве по сравнению с естественным уплотнением намытых пород. Применение каких-либо мероприятий, при которых будет иметь место так называемый "активный отдых", должно соответствовать условию $C_a < C_{\text{п}}$.

Решение перечисленных выше вопросов возможно путем анализа различных математических зависимостей. Очевидно, что эти зависимости должны включать время как параметр.

Для исследования условий, определяющих целесообразность окончания намыва пород на данном гидроотвале и перехода на новый гидроотвал, рассмотрим целевую функцию, отражающую затраты в зависимости от времени "отдыха".

В качестве целевой функции при исследовании гидроотвалообразования приняты приведенные затраты:

$$C = Z + EK/Q, \quad (V.7)$$

где Z — удельные эксплуатационные затраты; E — нормативный коэффициент экономической эффективности; Q — годовая производительность по грунту; K — капитальные затраты на горные работы и оборудование для гидравлической укладки грунтов.

Полные эксплуатационные затраты на гидроотвалообразование складываются из следующих элементов:

$$Z = Z_{п.п} + Z_{гидр} + Z_{дамб} + Z_{пр} + Z_{др.эл}, \quad (V.8)$$

где $Z_{п.п}$ — затраты на подготовку площади под гидроотвал, отчуждаемой у сельскохозяйственных предприятий; $Z_{гидр}$ — затраты на гидротранспорт пород по гидроотвалу и гидравлический подъем пульпы; $Z_{дамб}$ — затраты на возведение промежуточных дамб; $Z_{пр}$ — затраты на сооружение пригрузки; $Z_{др.эл}$ — затраты на создание дренажных элементов.

Затраты на подготовку площади под гидроотвал включают затраты на снятие и складирование плодородного слоя, а также затраты (при необходимости) на подготовку к сельскохозяйственным работам площадей, компенсирующих дополнительно изъятые земли в процессе гидроотвалообразования.

$$Z_{п.п} = Z_1 S_d / Q,$$

где Z_1 — затраты на подготовку ежегодного приращения площади, руб/м²; S_d — ежегодное приращение площади гидроотвала, м².

Затраты на процесс гидроотвалообразования включают: затраты на электроэнергию, которая расходуется на подъем и гидротранспорт пульпы по дамбе: амортизационные отчисления от стоимости землесосов и пульповодов; заработную плату с начислениями и прочие расходы; затраты на монтаж и демонтаж пульповодов по дамбе гидроотвала. Затраты на гидротранспорт можно непосредственно выразить в удельных затратах на 1 м³ укладываемых грунтов в виде затрат по элементам. Затраты на процесс гидроотвалообразования определяются в виде:

$$Z_{гидр} = \frac{1}{Q} [(1 + a_{мат}) Z_2 Q \mathcal{E}_r + (A_3 + A_{тр}) Q + Z_{п} Q],$$

где $a_{мат}$ — затраты на материалы в долях от затрат на электроэнергию; Z_2 — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии (определяется по справочному тарифу); A_3 и $A_{тр}$ — амортизационные отчисления на землесосные установки и трубопроводы; $Z_{п}$ — заработная плата и начисления; \mathcal{E}_r — потребления электроэнергии.

Расход электроэнергии, затрачиваемой на подъем гидросмеси на вы-

соту гидроотвала H и ее транспортирование по дамбе, определяем, используя следующие исходные положения: транспортирование производится землесосами; коэффициент загрузки и коэффициент спроса принимаются равными единице; изменения характеристик землесоса не учитываются. Тогда часовое потребление электроэнергии A землесосом будет:

$$A = Q_{\Gamma} H_{\Gamma} \gamma_{\text{в}} / (102 \eta_3),$$

где Q_{Γ} — производительность по гидросмеси; H_{Γ} — необходимый гидравлический напор; $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды; η_3 — к.п.д. землесоса.

Так как $Q_{\Gamma} = (1 + q_p - n) Q_{\text{ТВ}}$, где n — пористость грунта, q_p — удельный расход воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $Q_{\text{ТВ}}$ — производительность по грунту.

Расход электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = \frac{(1 + q_p - n) (H \gamma_{\Gamma} + L_{\text{д}} i_{\Gamma}) \gamma_{\text{в}}}{367 \eta_3},$$

где H — высота дамбы, γ_{Γ} — плотность гидросмеси; $L_{\text{д}}$ — длина транспортирования по дамбе; i_{Γ} — гидравлические потери напора ($\text{м}/\text{м}$).

Амортизационные отчисления от стоимости землесосов и заработная плата обслуживающего персонала зависят от количества землесосных установок. При заданной годовой производительности гидроотвала Q и его высоте H возможна схема работы $N_{\text{л}}$ параллельных линий производительностью $Q_{\text{л}}$, в каждой из которых работает последовательно $N_{\text{н}}$ землесосов с номинальной производительностью по пульпе $Q_{\text{ном}}$ и напором $H_{\text{ном}}$.

Тогда:

$$N_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{ном}}} = \frac{Q_{\text{ТВ}} (1 + q_p - n)}{Q_{\text{ном}}} \quad N_{\text{н}} = \frac{H \gamma_{\Gamma} + L_{\text{д}} i_{\Gamma}}{H_{\text{ном}}},$$

и общее число землесосов

$$N = N_{\text{л}} N_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{ТВ}} (1 + q_p - n) (H \gamma_{\Gamma} + L_{\text{д}} i_{\Gamma}) \gamma_{\text{в}}}{T_{\text{с}} Q_{\text{ном}} H_{\text{ном}}},$$

где $T_{\text{с}}$ — продолжительность сезона гидромеханизации.

Затраты на амортизационные отчисления:

$$A_3 = \alpha_3 Z_3 N,$$

где α_3 — норма амортизационных отчислений от стоимости землесоса Z_3 .

При годовой заработной плате Z_4 экипажа гидроустановки затраты на заработную плату и отчисления составят:

$$З_{\text{п}} = N Z_4.$$

Амортизационные отчисления от стоимости пульповодов пропорциональны длине дамбы $L_{\text{д}}$ и в расчете на 1 м^3 укладываемых пород определяются из выражения

$$A_{\text{тр}} = Z_5 \alpha_{\text{тр}} \frac{L_{\text{д}} (1 + q_p - n)}{Q_{\text{ном}}},$$

где Z — стоимость 1 м трубы; $a_{тр}$ — норма амортизационных отчислений от стоимости труб.

Затраты на перенос выпуска определяются из условия намыва пульпы в течение сезона по всей длине дамбы и в расчете на 1 м³ уложенной породы:

$$Z_{пв} = Z_6 \frac{L_d}{\Pi} \frac{(1 + q_p)}{Q},$$

где Z_6 — стоимость монтажа и демонтажа одной трубы и одного стыка крепления; Π — длина трубы или шаг наработки пульповода.

Затраты на пригрузку и дренажные элементы определяются из условия намыва тонкодисперсных грунтов на гидроотвале и соответственно вычисляются по формулам:

$$Z_{пр} = Z_8 V_{пр}/Q;$$

$$Z_{др.эл} = Z_9 V_{др.эл}/Q,$$

где Z_8 и Z_9 — соответственно стоимость укладки пород пригрузки и дренажных элементов; $V_{пр}$ и $V_{др.эл}$ — соответственно объемы пригрузки и дренажных призм.

Затраты на сооружение промежуточных дамб:

$$Z_d = Z_7 V_d/Q,$$

где Z_7 — стоимость возведения дамбы обвалования; V_d — объем дамб обвалования.

Капитальные затраты при гидравлической укладке пород складываются из затрат на подготовку площади, возведение первоначальной дамбы обвалования, приобретение оборудования и расчеты с организациями, эксплуатировавшими эти площади. Затраты на подготовку площади под гидроотвал пропорциональны занимаемой им площади S :

$$K_{п} = Z_{10} hS,$$

где Z_{10} — стоимость выемки, перемещения и складирования 1 м³ плодородного слоя мощностью h .

Затраты на строительство дамбы первичного обвалования пропорциональны первоначальной длине дамбы $L_{д.об}$ и вычисляются по формуле

$$K_{д.об} = \frac{1}{2} Z_{11} H_{д.об} L_{д.об} B',$$

где Z_{11} — удельная стоимость возведения дамбы; B' — средняя линия сечения дамбы.

Затраты на водосбросные сооружения пропорциональны годовой производительности гидроотвала Q .

$$K_{вс} = Z_{12} \frac{Q q_p}{Q_{вс}},$$

где Z_{12} — стоимость одного водосбросного сооружения с годовой пропускной способностью $Q_{вс}$.

Затраты на приобретение необходимого оборудования для гидроотвалообразования — бульдозера, грубоукладчика, трактора, — обеспечивающего выполнение годового объема работ Q_k , пропорциональны годовой производительности:

$$K_{об} = \frac{Q}{Q_k} (Z_{13} + Z_{14} + Z_{15}),$$

где Z_{13} , Z_{14} , Z_{15} — стоимость соответственно перечисленных механизмов.

Анализ слагаемых экономико-математической модели показывает, что в полученной зависимости приведенных затрат на гидроотвалообразование вида

$$C = f(H, S, L_d, Q, T)$$

параметры H , S и L_d зависят от топографической характеристики гидроотвала, а зависимость от времени намыва T выражена в неявном виде. Определяя текущие значения H , S и L_d при проведении конкретных расчетов, необходимо использовать топографические характеристики гидроотвала.

Для анализа общих закономерностей изменения затрат принято, что гидроотвалообразование производится в логу, что является характерным для условий КМА и Кузбасса. Лог характеризуется уклонами: i_1 — в поперечном сечении и i_2 — в продольном.

Для получения экономических параметров гидроотвала в его развитии ограничения по высоте дамбы не вводятся.

Согласно исходным условиям построения модели, отражающей приращение затрат во времени, надо определить приращение площади ΔS и пригрузки $\Delta V_{пр}$.

Приращение площади определяется из выражения

$$\Delta S = \frac{2}{3} \frac{\sqrt[3]{a_1^2 Q^2 T^2}}{i_1 i_2 T},$$

где $a_1 = 3/2i_1 (1 + i_2)$.

Длина дамбы L_d и объем породы V , уложенный в отвал на заданный момент времени T , определяются с учетом коэффициента разрыхления грунта K_p и показателя K_k , учитывающего уплотнение намывного массива:

$$L_d = \frac{2}{i_1} \sqrt[3]{a_1 K_k Q T};$$

$$V = Q K_p K_k T.$$

Величина удельного (на 1 м по длине дамбы) годового объема пригрузки для гидроотвала тонкодисперсных грунтов определяется в виде:

$$\Delta V = 0,2(1 + \sqrt[6]{v_H}) \left(H - \frac{10}{\sqrt[6]{v_H}} \right)^{1,5}.$$

H и v_H представлены как функции времени:

$$H = \sqrt[3]{a_1 K_K Q T},$$

$$v_H = \frac{a_1 K_P Q}{\sqrt[3]{(a_1 K_K Q T)^2}}.$$

Объем дренажных элементов зависит от объема уложенных в гидроотвал тонкодисперсных масс на данный период времени и определяется в процентном отношении Π от объема уложенного в гидроотвал грунта за период T .

Изменения главных параметров гидроотвала H , V , ΔS , $V_{пр}$, $V_{др.эл}$ имеют сложный характер. Высота дамбы и ее длина резко увеличиваются в начальный период намыва и затем монотонно возрастают. Объемы пород, которые необходимо уложить в качестве пригрузки дамбы, возрастают сравнительно небольшими темпами при малых значениях производительности и более резко при производительности $Q = 12$ млн. m^3 /год. Скорость намыва v_H , определяющая во многом прочностные характеристики намывного массива, резко снижается в первый период развития гидроотвала, а затем убывает монотонно. Изменение ежегодного приращения площади характеризуется постепенным выполаживанием убывающей кривой, однако ее характер зависит от производительности намыва. Объемы дренажных элементов сравнительно быстро растут в начальный период и потом монотонно возрастают.

Для исследования экономико-математической модели составлена целевая функция вида (V.7) с учетом рассмотренных расчетных зависимостей для определения элементов затрат на гидроотвалообразование.

Затраты на гидротранспорт по дамбе и гидроподъем определены исходя из следующих условий:

$$Z_2 = 0,01 \text{ руб/кВт-ч}; \quad a_{\text{мат}} = 0,3; \quad q_p = 7 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad n = 0,3;$$

$$i_T = 0,03 \text{ м/м}; \quad T_c = 3600 \text{ ч/год}; \quad Q_{\text{ном}} = 2000 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$H_{\text{ном}} = 70 \text{ м}; \quad \eta_3 = 0,65; \quad a_1 = 0,33;$$

$$a_{\text{тр}} = 0,25; \quad \text{III} = 25 \text{ м}; \quad h = 2 \text{ м}.$$

Структура суммарных эксплуатационных затрат при $Z_1 = 0,5$ руб/ m^2 представлена на рис. 55, 56, причем в затратах на процесс гидроотвалообразования выделены гидроподъем и гидротранспорт. Как следует из графиков, удельные затраты, связанные с ежегодным отчуждением площади, имеют значительные (до 25–30 %) удельный вес в первые годы возведения гидроотвала.

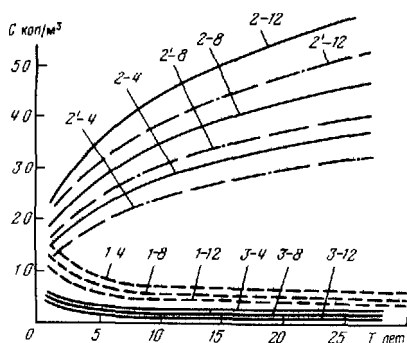


Рис. 55. Зависимости затрат от времени формирования сооружения соответственно при $Q = 4; 8; 12$ млн. $\text{м}^3/\text{год}$: на отчуждение земель (соответственно 1-4, 1-8, 1-12); гидроподъем (2-4, 2-8, 2-12); гидротранспорт по дамбе (2'-4, 2'-8, 2'-12), сооружение промежуточной дамбы обвалования (3-4, 3-8, 3-12)

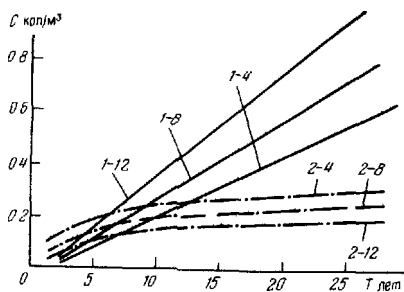


Рис. 56. Зависимости от времени формирования сооружения затрат на пригрузку (1-4, 1-8, 1-12) и дренажные элементы (2-4, 2-8, 2-12) соответственно для производительности по грунту 4; 8; 12 млн. $\text{м}^3/\text{год}$

Затраты на гидротранспорт и гидроподъем монотонно возрастают с увеличением периода намыва гидроотвала, причем это слагаемое целевой функции в значительной степени увеличивается с ростом производительности по гидровскрыше. Удельный вес этих затрат может достигать 70–90 %.

Затраты на сооружение пригрузки, обеспечивающей устойчивость дамбы в процессе ее роста, увеличиваются почти от нуля до 7–10 %. Затраты на дренажные элементы, зависящие от уложенного объема, монотонно возрастают с увеличением периода намыва гидроотвала и достигают 2–4 %.

Полные затраты на гидроотвалообразование, включающие гидротранспорт и гидроподъем, оплату площади, сооружение пригрузки, промежуточных дамб обвалования и дренажных элементов, приведены на рис. 57. Характер изменения полных эксплуатационных затрат в общем одинаков, а величина их зависит от производительности по гидровскрыше. Значения ΣC при изменении Z_1 в пределах 0,5–2 руб/ м^2 для $Q = 4$ –12 млн. $\text{м}^3/\text{год}$ увеличиваются на 0,4–1,2 коп/ м^3 по отношению к данным рис. 57.

Высота дамбы, соответствующая экономически целесообразному пе-

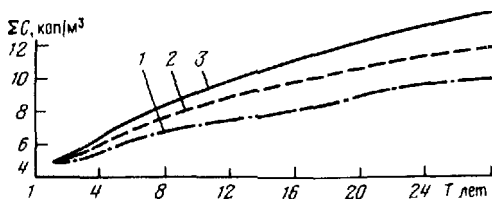


Рис. 57. Зависимости суммарных затрат на гидроотвалообразование от времени намыва при годовой производительности по грунту 4 (1), 8 (2), 12 (3) млн. м^3

реходу на новый гидроотвал, и другие конечные параметры гидроотвала определяются из условия (V.5).

Текущие затраты определяются из выражения, которое состоит аналогично ранее приведенной целевой функции.

Минимальное расстояние от гидроотвала до карьера

$$L_{\min} = L_{\kappa} + L_{\text{пр}},$$

где L_{κ} — ширина бермы, на которой не должен размещаться дополнительный объем породы, определяемая расчетом при проектировании откоса борта карьера; $L_{\text{пр}}$ — ширина бермы, на которой размещается пригрузка;

$$L_{\text{пр}} = 0,5 \left[h_0 \operatorname{ctg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \sqrt{h_0^2 \operatorname{ctg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - 4 V_{\text{пр}} \left[\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right]} \right],$$

где h_0 — мощность слабого основания; φ — угол внутреннего трения; α — угол откоса насыпного массива пригрузки; $45^\circ - \varphi/2$ — угол, образуемый линией скольжения тела дамбы с горизонталью.

Расположение гидроотвала, первоначально вводимого в эксплуатацию, уточняется после определения его конечной высоты H_{κ} .

В целях сокращения затрат на гидравлическое перемещение грунтов гидроотвал целесообразно располагать в непосредственной близости от контура карьера. При конечной высоте гидроотвала следует уложить объем пригрузки, обеспечивающий необходимый коэффициент запаса устойчивости дамбы с учетом высоты и класса ответственности намывного сооружения. Пригрузка должна располагаться вне слабейшей линии скольжения в прибортовом массиве карьера при достижении им максимальной глубины.

Технологическими параметрами гидроотвальных работ являются производительность гидроустановок, их число, параметры гидроотвала (объем V , высота H , площадь S , длина дамбы $L_{\text{д}}$), являющиеся функциями топографии поверхности, выбранной для гидроотвалообразования. Первые два параметра характеризуют приемную способность гидроотвала и определяются условиями ведения горных работ в карьере.

Эксплуатацию гидроотвала целесообразно производить до определенной высоты, выбираемой исходя из экономических условий с учетом геомеханических ограничений. Этому значению высоты H соответствуют значения остальных параметров V , S , $L_{\text{д}}$.

ПОДГОТОВКА НАМЫВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

VI.1. РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Наиболее значительный опыт рекультивации намывных горно-технических сооружений накоплен в бассейне КМА, где около 5 тыс. га занято гидроотвалами и хвостохранилищами. Исследованиями, проведенными НИИКМА им. Л.Д. Шевякова совместно с Воронежским лесотехническим институтом, Курским и Днепропетровским сельскохозяйственными институтами, Московским почвенным институтом им. В.В. Докучаева, доказано, что рельеф и типы почв территории КМА позволяют вести горные работы без нарушения баланса земель, находящихся в сфере сельскохозяйственного использования. Ландшафтно-экологические исследования в различных регионах страны привели к признанию необходимости комплексного подхода к реконструкции и оптимизации техногенных ландшафтов. Экологические основы рекультивации наиболее детально рассмотрены на примере Подмосковского буроугольного бассейна*.

Размещение вскрышных пород в оврагах и балках, значительная часть территорий которых является непригодной или малопригодной для сельскохозяйственного использования, позволяет после проведения рекультивационных мероприятий улучшить структуру земельного фонда за счет создания новых плодородных площадей и повышения продуктивности эродированных участков, прилегающих к действующим горным предприятиям. Объем овражно-балочной сети, расположенной на удалении 5–10 км от горных предприятий КМА, составляет свыше 5 млрд. м³ (включая перспективный Чернянский ГОК).

Общие требования к подготовке отвальных территорий для последующего использования изложены в работах [35, 38, 39].

Условия рекультивации гидроотвалов по сравнению с отвалами сухой вскрыши имеют как преимущества, так и недостатки. С одной стороны, геометрические формы намывных массивов, обусловленные особенностями технологии, не требуют больших планировочных работ, что значительно упрощает горнотехнический этап рекультивации. С другой стороны, при укладке в гидроотвалы тонкодисперсных, разжиженных грунтов формируются мощные намывные толщи, отличающиеся весьма низкой несущей способностью и слабой водоотдачей. Производство работ на поверхности таких массивов возможно лишь по истечении длительного времени или после выполнения специальных инженерных мероприятий. Главным

* Экологические основы рекультивации земель. Под ред. Н.М. Черновой. М., Наука, 1985.

мероприятием при этом является удаление воды из прудковой части гидроотвала и организация стока атмосферных осадков. Необходимо отметить, что это простое мероприятие зачастую игнорируется, чем задерживается последующее использование гидроотвальных площадей. Так, центральная зона гидроотвала № 1 Лебединского карьера, как и пруд-отстойник гидроотвала Михайловского карьера, в течение длительного периода находились в разжиженном, недоступном для серийных машин состоянии, являясь емкостями для сбора атмосферных осадков и грунтовых вод.

Аналогичные затруднения могут встречаться также при освоении прудковых зон хвостохранилищ.

Большое народнохозяйственное значение имеет утилизация отвальных масс, являющихся своеобразными отходами горного производства. НИИКМА, МГИ, БелГИСМ и другими организациями определена принципиальная возможность организации безотходного производства на базе минеральных ресурсов КМА. Однако в настоящее время эта проблема решена лишь частично.

Технологические возможности гидромеханизации вскрышных работ и строение осадочной толщи Старооскольской группы месторождений КМА позволяют не только раздельно разрабатывать и складировать различные по типам породы, но и попутно обогащать некоторые из них (промывка и классификация песчаных разностей, выделение скальных включений и др.). В частности, в опытным порядке Губкинским строительным управлением треста "Гидромеханизация" с помощью простейшего пульподелителя попутно с укладкой в гидроотвал вскрышных пород, представленных альбскими песками, намыто более 30 тыс. м³ песчаных разностей с модулем крупности 2–2,3, получивших высокую оценку в качестве заполнителя бетона.

Законсервированные гидроотвалы карьеров КМА с учетом их местоположения, состава и несущей способности намывных грунтов, а также хозяйственных потребностей района следует использовать:

№ 1 Лебединского карьера после выполнения специальных инженерных мероприятий — для размещения склада песка завода силикатных изделий; № 2, состоящий преимущественно из песчаных пород, как штабель песка для строительных целей; № 3 рекультивирован и превращен в опытный участок; "Симонова пасека" Стойленского карьера вошел в состав хвостохранилища Лебединского ГОКа. Большая часть песчаных пород, слагающих упорную призму и промежуточную зону этого гидроотвала, вывезена и использована в строительных целях; гидроотвал Михайловского карьера после выполнения специальных инженерных мероприятий намечено занять железнодорожными отвалами.

Реализация намеченных мероприятий по дальнейшему использованию гидроотвальных площадей позволит несколько сократить изъятие новых земель для нужд промышленности и строительства.

Проектом ("Союзгипролесхоз") установлены два направления использования рекультивируемой площади действующего гидроотвала "Бере-

зовый Лог": сельскохозяйственное (поверхность гидроотвала) и лесохозяйственное (откосы и бермы упорной призмы).

Горнотехнический этап рекультивации включает: снятие, транспортирование и складирование гумусового слоя почв с площадей, занимаемых гидроотвалом; транспортирование и нанесение гумусового слоя почв мощностью 0,5 м на поверхность гидроотвала после окончания намывных работ; транспортирование и покрытие слоем лёссовидных суглинков или чернозема мощностью 0,3 м откосов и берм упорной призмы гидроотвала; глубокое (1–2 м) перемешивание уложенных на упорной призме суглинков с подстилающими их песками.

Биологический этап рекультивации включает: фитомелиорацию почвенного слоя рекультивируемой поверхности посредством выращивания многолетних трав на протяжении пяти лет; закрепление откосов и берм упорной призмы многолетними травами с трехлетним периодом их выращивания.

На основе опыта проектирования строительства и эксплуатации намывных горнотехнических сооружений разработана новая схема объединенного гидроотвального хозяйства, предусматривающая складирование в гидроотвале в балке Чуфичева вскрышных пород объединенного карьера Лебединского горно-обогатительного комбината, рекультивацию гидроотвала "Березовый Лог", складирование хвостов обогатительных фабрик № 1 и 2 комбината "КМАруда", а также золошлаков Губкинской ТЭЦ (рис. 58) [40].

Новая схема объединенного гидроотвального хозяйства предусматривает:

консервацию ранее действующих хвостохранилищ и золоотвалов ТЭЦ путем замыыва их поверхностей четвертичными суглинками;

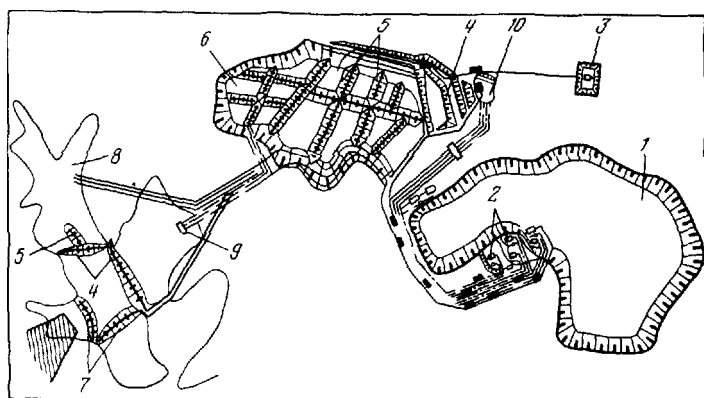


Рис. 58. Схема объединенного гидроотвального хозяйства:

1 - объединенный Лебединский карьер; 2 - гидровскрышные комплексы типа 20Р-11М; 3 - резервная емкость; 4 - упорные призмы гидроотвала "Березовый Лог" и гидроотвала "Балка Чуфичева"; 5 - дренажные призмы; 6 - хвостохранилище комбината "КМАруда"; 7 - защитные дамбы заповедника "Ямская степь"; 8 - гидроотвал меловых грунтов; 9 - насосные станции типа 22НДС; 10 - отстойник

создание резервной емкости, предназначенной для самотечного сброса в нее хвостов обогатительных фабрик и золошлаков ТЭЦ с последующим напорным транспортированием этих материалов в гидроотвал "Березовый Лог" с помощью землесосного снаряда типа 350-50Л и перекачивающих станций соответствующего типа;

организацию сброса в резервную емкость с уровнем воды, поддерживаемым ниже уровня р. Осколец, недостаточно очищенных стоков шахтных вод, а также аварийных сбросов ТЭЦ, обогатительных фабрик и гидроотвала.

Достоинства новой схемы:

ликвидация ветровой эрозии поверхности хвостохранилища и золоотвала;

исключение загрязнения р. Осколец;

прекращение забора воды из р. Осколец для нужд гидромеханизации, так как с внедрением новой схемы вместе с хвостами обогащения и золошлаками ТЭЦ в гидроотвал дополнительно поступает около 2,8 тыс. м³/ч воды;

возможность искусственного ускорения консолидации разжиженных масс ядерной зоны гидроотвала, что позволило повысить вместимость и ускорить рекультивацию его поверхности;

наличие резервной емкости придает схеме достаточную гибкость, что позволило отказаться от использования резервного оборудования и трубопроводов;

создание единого отвального хозяйства позволило повысить уровень эксплуатации и надзора за сооружениями и оборудованием;

внедренный ранее на хвостохранилище "Грачев Лог" и золоотвалах ТЭЦ способ подавления пыли, заключающийся в периодическом тонкослойном замыве открытых пляжей глинистой пульпой, применяется на гидроотвале "Березовый Лог" без дополнительных затрат, так как поверхность замывается слоем суглинка при выполнении горнотехнической рекультивации.

В результате рекультивационных работ на откосах ограждающей дамбы гидроотвала подготовлено и сдано под лесопосадки 180 га. На бермах и откосах с углами наклона 8—12° посеяны многолетние травы (эспарцет, люцерна, овсяница).

Проект рекультивации внутренних зон гидроотвала "Березовый Лог", выполненный Украинским отделением Гидропроекта и ПК "Гидромех-проект", предусматривал намыв в объеме (тыс. м³): дренажных призм — 1900, песчаной подушки — 17200, защитного слоя и суглинков — 8636, укладку (отсыпку и намыв) чернозема — 400. Проектом также предусматривалось строительство ливнеотводной системы.

После разделения секций с помощью отсечных призм на карты намыва производилась укладка фильтрующей подушки мощностью 3 м. Намыв подушки осуществлялся безэстакадным способом. В качестве материала подушки использовались как пески (около 9 млн. м³), так и отходы рудобогащения (более 8 млн. м³). Одновременно выполнялись работы по

горнотехнической рекультивации нескольких карт, в которых производилась последовательная укладка пористого штампа, защитного слоя суглинка мощностью до 1 м и слоя чернозема мощностью до 0,5 м. Очередность укладки чернозема и планировочных работ с применением колесной и гусеничной техники в различных секциях устанавливалась на основе данных прогнозных расчетов несущей способности слоев тонкодисперсных грунтов и оперативного геомеханического контроля с применением аэрофотограмметрической съемки и комплексного зондирования.

С использованием результатов опытно-промышленных работ Ю.Н. Дьячковым и И.С. Булгаковым определены конструктивные и технологические параметры секционной подготовки гидроотвалов к рекультивации [41]. Через количество секций (n_c) определяется необходимое число разделительных дренажных призм ($n_c - 1$).

Установлены зависимости между основными технологическими параметрами подготовительных работ: годовой производительностью гидровскрышных комплексов по тонкодисперсным грунтам и фильтрующим материалам, геометрическими размерами дренажных элементов и секций, скоростями формирования дренажных элементов и секций. Определены также зависимости изменения технологических параметров от числа секций, величины недомыва гидроотвала при начале секционирования Δh , высоты гидроотвала в рассматриваемой точке h_d и др.

В качестве основного критерия оценки параметров подготовки неконсолидированных намывных толщ принята сумма эксплуатационных и капитальных затрат с учетом фактора времени.

В качестве граничного момента для отсчета времени рассматривался конечный год заполнения гидроотвала.

После обработки результатов расчетов основных элементов экономико-математической модели получены зависимости изменения затрат от основных технологических параметров.

На основе анализа полученных зависимостей изменения затрат по сумме эксплуатационных и капитальных затрат установлено следующее:

1. От увеличения числа секций для гидроотвалов площадью до 300–400 га (вместимостью до 50–80 млн. м³) суммарные затраты увеличиваются; для гидроотвалов площадью более 300–400 га (вместимостью более 100 млн. м³) суммарные затраты изменяются по параболической зависимости и имеют минимум при числе секций, равном 2–4.

2. От увеличения годовой производительности гидровскрышных комплексов снижаются все затраты.

3. От увеличения Δh при постоянном числе карт суммарные затраты для гидроотвалов площадью 300–400 га увеличиваются, для гидроотвалов площадью более 400 га суммарные затраты изменяются по параболической зависимости и имеют минимум при h_d , равной 6–12 м.

Разработаны рекомендации по параметрам карьерных гидроотвалов для четырех ГОКов КМА (действующих и перспективных: Лебединского, Стойленского, Губкинского и Чернянского).

В связи с большим количеством подлежащего размещению на площади

Таблица 21

Расчетное сечение (№ скв. на рис. 28)	Мощность глинисто-мелового слоя, м	Общая степень уплотнения U_{Σ}	Остаточная осадка S_p , м	Период стабилизации $t_{ст}$ лет	Примечания
1	16	0,72	0,46	1,5	S_p определена на основании данных замеров порового давления, осадок и зондирования. Глинисто-меловый слой в скв. 3 располагается на дренаже
2	43	0,76	1,0	9	
3	30	0,87	0,36	4	
4	18	0,83	0,25	2	
5	8	0,95	0,04	0,5	

гидроотвала "Березовый Лог" чернозема возникла необходимость в укладке его гидромеханизированным способом. Для проведения этих работ использовали близко расположенные навалы чернозема, которые разрабатывались гидромониторно-землесосной установкой 20Р-11М. Для нужд сельского хозяйства сдано около 700 га земель, засаженных многолетними травами. После окончания рекультивационных работ площадь пахотных земель составила 788 га, прирост — 328 га (было изъято 460 га пашни).

Проектные отметки заполнения гидроотвала принимались с учетом остаточной осадки S_p , т. е. разности между общей стабилизированной осадкой S_{Σ}^{∞} и осадкой на момент завершения намыва:

$$S_p = S_{\Sigma}^{\infty} (1 - U_{\Sigma}).$$

В табл. 21 представлены результаты расчетов остаточных осадок намывного массива и сроков их стабилизации для профиля I—I (см. рис. 29) по оси дренажной призмы № 1. Для профиля III—III по оси дренажной призмы № 2, где коэффициент консолидации тонкодисперсных грунтов существенно снижается (см. табл. 21) при увеличении коэффициента сжимаемости, остаточные осадки для глинисто-меловых слоев мощностью 24–25,5 м составляют 2,06–2,25 м, а сроки их стабилизации достигают 18–20 лет после завершения формирования дренажной призмы.

Продолжительность периода стабилизации осадок для намывных массивов значительно больше, чем для отвальных насыпей из подобных грунтов. Наиболее интенсивная осадка отвальных насыпей ($\geq 0,8S_{\infty}$) происходит в первые два года после их формирования [17, 39]. Поэтому считается целесообразным окончательную планировку поверхности отвала осуществлять через два года с последующим нанесением почвенного слоя [39]. Для прогноза уплотнения отвальных насыпей преимущественно используются эмпирические данные. Рекультивационные работы на поверхности намывных массивов, в пределах которых созданы дренажные элементы, можно начинать практически сразу после завершения намыва сооружений до проектных отметок. При этом окончательный контур по-

верхности внутренних зон следует принимать с учетом остаточных осадков, надежно определяемых расчетным путем, и необходимых для обеспечения поверхностного стока уклонов.

Организация поверхностного стока на рекультивированной поверхности осуществляется созданием уклона, а также с помощью вертикальных водосборных колодцев, ливнестоков, перепадов и т. д.

Для гидроотвала Лебединского ГОКа в балке Чуфичева (см. рис. 33) анализ расчетных и натурных данных об уплотняемости массива намывных меловых грунтов показал, что требуемая несущая способность намывного массива ($P_{\text{доп}} = 0,15 \text{ МПа}$) обеспечивается созданием песчаных дренажных призм и отсечных дренажных дамб. Поэтому создание фильтрующей подушки нецелесообразно. Формирование дренажных призм объемом до 600 тыс. м^3 на одну секцию гидроотвала в балке Чуфичева (т. е. в объеме перемыва с учетом остаточных осадков) обеспечивает возможность эффективной укладки суглинка и беспрепятственного производства рекультивационных работ.

Для сокращения сроков отчуждения земель в пределах балки Чуфичева выделено три секции (см. рис. 58), в которых складирование гидро-вскрыши и рекультивация осуществляются поэтапно. При этом учитываются площадь и ценность изъятых земель, длительность отчуждения, ценность и площадь рекультивированных территорий.

Профиль рекультивационного яруса должен обеспечить перехват сточных вод с прилегающих территорий для предотвращения водной эрозии, а также исключить образование застойных зон (за счет стока ливневых и паводковых вод) и смыв плодородного слоя. Требуемый уклон поверхности $0 < i < 3^\circ$.

Уклон пляжа намыва суглинка 1:200 – 1:300 (12–18'). При средней ширине гидроотвала 750 м высота перемыва составит 1,875 м с учетом укладки защитного слоя из суглинка от дренажной призмы к естественной поверхности. Увеличение объема гидроотвала в 3-й секции гидроотвала балки Чуфичева с учетом остаточных осадков и требований к формированию восстановленной поверхности составит около 2 млн. м^3 . После стабилизации осадки намывной толщи ($S_p \leq 0,3 \text{ м}$) уклон поверхности составит $i = 0,0045$ (1:220).

Порядок работ по горнотехнической рекультивации гидроотвала в балке Чуфичева приведен ниже:

1. Для аккумуляции ливневых и паводковых вод с прилегающих территорий в верхней части балки создают емкости (район с дефицитом осадков) путем возведения отсечных дренажных дамб. Аккумулированная вода используется для полива полей. При откачке воды из аккумулялирующих емкостей создается напор, равный разности отметок воды в гидроотвале и емкости, значительно сокращается путь горизонтальной фильтрации воды из ядерной зоны гидроотвала и форсируется процесс консолидации намывных тонкодисперсных толщ (см. рис. 33),

2. От упорной призмы к отсечным дамбам пионерно-торцевым способом производится намыв дренажной призмы, которая является основ-

ным фильтрующим элементом, связывающим упорную призму и ядерную часть гидроотвала,

3. Намываются пляжные откосы по периметру гидроотвала по односторонней схеме намыва,

4. Строятся водосбросные каналы для перехвата и пропуска сточных вод с прилегающих территорий и водорегулирующие устройства,

5. Намываются разделительные дамбы,

6. Производится гидромеханизированная укладка защитного слоя суглинка. Намыв производится с дренажной призмы; осветленная вода сбрасывается в прудок-аккумулятор и через водосбросные каналы во внешнюю накопительную емкость,

7. Производится укладка чернозема.

Рассмотренная технология формирования гидроотвала в балке Чуфичева обеспечивает вовлечение в сферу сельскохозяйственного использования дополнительных площадей в результате создания территорий горизонтальной планировки на месте малопригодных овражно-балочных участков.

После завершения рекультивации площадь плодородных земель в балке Чуфичева составит 493 га, что на 249 га больше первоначально изъятой площади. Таким образом, вся занятая гидроотвалом площадь становится пригодной для сельскохозяйственного использования.

Вопросы повышения эффективности рекультивационных работ и разработки принципиальных технологических схем подготовки территорий заполненных и действующих гидроотвалов для последующего использования решались применительно к условиям намывных объектов Семилукского огнеупорного завода. Предварительная оценка состояния намывных масс для определения их физико-механических свойств произведена методом инженерно-геологических аналогий. Для гидроотвалов карьера "Стрелица" приняты характеристики глинисто-меловых масс одного из геологических подучастков гидроотвала "Березовый Лог".

С учетом формирования мульд оседания при "пассивном отдыхе" равномерная засыпка поверхности гидроотвалов слоем суглинка представляется нецелесообразной. Установлено, что мощность слоя насыпных суглинков следует изменять от максимальной над зоной с наибольшей мощностью тонкодисперсных намывных грунтов до минимальной в пределах пляжной зоны.

При таком подходе возможно сокращение объемов насыпных суглинков примерно на 30 % (и соответственно затрат на их транспортирование). Наибольший интерес в отношении рекультивации представляют гидроотвалы № 4, 6, 7 и 8 карьера "Стрелица" и № 5, 6 карьера "Ендов Лог". Для ускорения возврата земель в сельскохозяйственный оборот предложено произвести рекультивацию гидроотвалов комбинированным способом, предусматривающим:

рекультивацию периферийной зоны, включая пляжную часть, с применением сухоройных механизмов, так как в этом случае не требуется "отдыха" для начала сельскохозяйственных работ;

подготовку и рекультивацию обладающей низкой несущей способностью и нуждающейся в длительном отдыхе центральной прудковой зоны с применением средств гидромеханизации для намыва песчаных дренажных элементов (сброс воды и мелких частиц грунта производится через шандорные колодцы или с применением плавучей землесосной станции).

Наиболее представительные исследования технологии нанесения на поверхность гидроотвалов плодородного слоя с применением средств гидромеханизации выполнялись в НИИКМА (Б.А. Симкин, А.М. Бабец, В.И. Титовский) [37]. В ходе этих исследований изучались также изменения состава и структуры плодородных грунтов в процессе транспортирования их по трубам. На основании анализа результатов опытных намывов плодородного слоя с применением земснарядов и гидромониторов установлено:

данная технология рекультивации рациональна только для горизонтальных участков;

при разработке грунтов плавучими земснарядами для получения более плотной консистенции пульпы заборное устройство земснарядов необходимо оснащать специальными фрезами или механическими рыхлителями;

снижение фракционирования намываемых грунтов может быть достигнуто за счет рассредоточения выпусков при кольцевом или встречном способе намыва;

показатели агробиологических свойств свидетельствуют о пригодности намывного чернозема к биологическому освоению, за исключением пляжной зоны, сложенной песчаными фракциями, выпавшими из черноземной пульпы.

С учетом отмеченных выше недостатков традиционной технологии ведения гидромеханизированных работ по рекультивации проведены эксперименты по получению плотных пульп из плодородного грунта и воды в смесительной установке. Установлено, что создание густых пульп с соотношением Т:Ж около 1:1 позволяет исключить большинство недостатков непосредственного намыва и получить вполне удовлетворительные физико-механические и агробиологические свойства плодородной пульпы. Шаг передвижки трубопроводов при рекультивации плотными пульпами определяется в зависимости от дальности растекания пульпы, ее консистенции и уклона поверхности участка производства работ. При экспериментальных исследованиях установлены расстояния растекания густой черноземной пульпы при Т:Ж от 1:0,7 до 1:1,3. Например, при угле наклона поверхности участка рекультивации 3° черноземная пульпа с Т:Ж = 1:1 растекается на 62 м.

Объем планировочных работ при рекультивации плотными пульпами оценивается в 12 % от общего объема намывного грунта. Промышленному внедрению этой перспективной технологии рекультивационных работ препятствует отсутствие надежных способов сгущения гидросмеси.

Внедрение технологии формирования намывных массивов, обеспечивающей форсирование консолидации тонкодисперсных грунтов рекуль-

Таблица 22

Культура	Средняя урожайность, ц/га	Закупочная цена 1 ц продукции, руб.	Стоимость валовой продукции, руб./га	Производственные затраты, руб.		Чистый доход, руб/га
				на 1 га	на 1 ц	
Эспарцет	218	4,98*	1085,64	558,08	2,56	527,56
Озимая пшеница	27,8	9,80	272,44	147,62	5,31	124,8
Сахарная свекла	230	5,10	1173,00	926,90	4,03	246,1
Ячмень	24,5	11,90	291,55	106,82	4,36	184,73
Кукуруза на силос	250	1,88*	470,00	115,00	0,46	355,00
Озимая рожь	26,1	14,00	365,40	150,86	5,78	214,54
Просо	24,4	14,60	356,24	143,47	5,88	212,77
Картофель	125	12,50	1562,50	1233,75	9,87	328,75
Горох	22,4	20,00	448,00	137,54	6,14	310,46
В среднем по культурам	—	—	669,42	391,12	—	278,3

тивационных работ практически одновременно с завершением укладки гидровскрыши, позволяет получить значительный экономический эффект от ускоренного ввода в среду сельскохозяйственного использования рекультивированных земель внутренних зон и гидроотвалов. В табл. 22 приведены данные Губкинского РАПО Белгородской обл., используемые для расчета экономической эффективности сельскохозяйственного освоения восстановленных территорий на объектах Лебединского ГОКа.

На крупных гидроотвалах и хвостохранилищах значительную часть их площади занимают откосные сооружения, подлежащие лесной рекультивации. Вопросы лесной рекультивации отвалов в бассейне КМА детально изучены коллективом сотрудников Воронежского лесотехнического института под руководством И.В. Трещевского. С учетом лесорастительных условий преобладающих горных пород рекомендуется создавать древесные насаждения следующих категорий:

на откосах всех отвалов крутизной более $8-10^{\circ}$ — только противоэрозионные насаждения,

на поверхности и пологих склонах суглинистых и глинистых отвалов при площади поверхности более 50 га — насаждения общего хозяйственного назначения,

на поверхности и пологих склонах суглинистых и глинистых отвалов при площади поверхности более 50 га — насаждения общего хозяйственного назначения или систему полезащитных лесных полос в случае сельскохозяйственного освоения отвалов;

на поверхности и пологих склонах меловых, песчано-меловых и меломергельных отвалов при площади поверхности до 50 га — противоэрозионные насаждения;

на поверхности и пологих склонах меловых, песчаных, песчано-меловых и меломергельных отвалов при площади поверхности более 50 га — противозерозионные насаждения или систему полезашитных лесных полос после землевания и сельскохозяйственного освоения;

при расположении отвалов в зоне городов и населенных пунктов — лесопарковые и парковые насаждения независимо от состава горных пород.

Основными факторами, определяющими типы лесных культур, являются состав горных пород в отвальных землях и назначение выращиваемых насаждений. На типы и технологию выращивания лесных культур оказывают влияние срок выветривания горных пород, элементы рельефа, а также общие условия — климатические, биологические особенности древесно-кустарниковых растений. Для преобладающих горных пород и отдельных грунтосмесей Воронежским лесотехническим институтом определен ассортимент древесно-кустарниковых пород для широкого и ограниченного использования. Однако выбор основной породы и способ выращивания лесных культур рекомендуется осуществлять с учетом целевого назначения насаждений.

На отвальных породах и технических смесях по сравнению с зональными почвами в первые годы жизни отмечен резко притупленный рост всех древесных и кустарниковых растений. В дальнейшем интенсивность роста культур увеличивается, но все-таки остается низкой. По энергии роста на отвальных землях древесно-кустарниковые породы делятся на 3 группы: слабого, среднего и более интенсивного роста. Слабую энергию роста имеют ель обыкновенная, лиственница сибирская, ясень зеленый, жасмин душистый и магнолия падуболистная. Средняя энергия роста характерна для вяза мелколистного, клена ясенелистного и остролистного, сосны обыкновенной и банкса, яблони, груши, рябины обыкновенной, черемухи обыкновенной, ивы плакущей и серой, дуба черешчатого, терна, лещины, пузыреплодника калинолистного, жимолости татарской, малины. К породам более интенсивного роста отнесены акация белая и желтая, тополя, облепиха крушиновая, лох узколистный, береза бородавчатая, ольха серая, ива белая, смородина золотистая и бузина красная.

На всех горных породах лучшие результаты по приживаемости и росту дают облепиха крушиновая, акация белая, ольха серая, лох узколистный, акация желтая и при хорошем увлажнении — тополь и ива белая. Этот ассортимент может быть расширен с учетом свойств отдельных пород.

Воронежским лесотехническим институтом разработана также методика определения экономической эффективности лесной рекультивации, предусматривающая определение ущерба от ведения горных работ, капиталовложений на рекультивацию, снижения ущерба от лесоразведения и суммарного эффекта от лесных насаждений.

Вопросы рекультивации нагруженных отвальными насыпями гидроотвалов рассмотрены в работе ВНИМИ [32]. К отличительным особенностям нагруженных гидроотвалов в связи с их рекультивацией относятся: зональность в строении намывных массивов; неравномерная осадка

поверхности отвалов из-за различий деформационных свойств тонкодисперсных грунтов в пределах выделенных зон и изменения и их мощности; большая продолжительность процесса консолидации, измеряемая годами и десятилетиями; возможность появления в техногенном рельефе понижений и соответственно скоплений атмосферных вод и снижения продуктивности рекультивируемых территорий. Методы и средства рекультивации выбираются дифференцированно применительно к поверхности размещенной на гидроотвале отвальной насыпи или приоткосной зоне пляжа намыва, откосам дамбы гидроотвала и откосам отвальной насыпи. Мощность и структура рекультивационного слоя, отсыпаемого или намываемого на поверхности сухого отвала, должны соответствовать направлению биологической рекультивации и химическому составу пород верхней части отвальной насыпи. Рекультивационный слой в общем случае включает слои экранирующих (капилляропрерывающих), потенциально плодородных и плодородных грунтов. Экранирующий слой создается в случаях, когда в верхней части отвальной насыпи уложены непригодные по химическим свойствам породы. В некоторых случаях рекультивационный слой может формироваться только из потенциально плодородных грунтов.

Виды и объемы восстановительных работ определяются применительно к конкретным объектам в зависимости от направления рекультивации.

Вопросы стабилизации и восстановления хвостохранилищ в СССР и за рубежом рассмотрены в работах [5, 9, 10]. Важнейшим природоохранным мероприятием на хвостохранилищах является закрепление их пылящей поверхности биологическим, химическим, аэродинамическим, гидротехническим, технологическим или механическим способами [5].

При создании растительного покрова на поверхности хвостохранилищ (биологический способ) затраты на восстановление в зависимости от дальности перевозки почвенной массы и вида транспорта изменяются от 2 до 40 тыс. руб/га [10]. Стоимостные показатели восстановительных работ достигают минимальных значений при использовании средств гидромеханизации для доставки грунтов защитного слоя и почвенной массы. В этом плане интересен опыт восстановления сухих пляжей хвостохранилища комбината "КМАруда" путем покрытия намывным суглинком из пород вскрыши Лебединского карьера. Для пылеподавления на намывных объектах КМА применяется следующий комплекс мероприятий: подводный намыв подверженных ветровой эрозии материалов под защитой ограждающих дамб; поддержание поверхности намыва в смоченном состоянии посредством систематической смены мест выпуска пульпы; покрытие пылящей поверхности слоем глинистой пульпы; посев трав и посадка кустарников.

Химическая стабилизация получила наибольшее распространение на предприятиях цветной металлургии. При использовании этого способа производится обработка намывного материала вяжущими веществами для создания на поверхности хвостохранилища пленок или корок, препятствующих сдуванию пыли. Недостатком вяжущих реагентов (кохе-

рекса, нерозина, битумной эмульсии и др.) является опасность загрязнения поверхностных и подземных вод.

Ежегодные объемы выхода золошлаков при эксплуатации теплоэлектростанций исчисляются десятками миллионов кубических метров. Складирование таких объемов дисперсного материала приводит к интенсивному запылению прилегающих территорий значительной площади и вызывает резкое ухудшение окружающего ландшафта (загрязнение воздушного бассейна продуктами дефляции золоотвалов).

На базе Экибастузского месторождения предусмотрено строительство электростанций, при эксплуатации которых ежегодные объемы золошлаков составят около 50 млн. м³. Складирование золы предусмотрено в естественном понижении рельефа у оз. Карасор с перспективной площадью 240 км² и объемом 3 млрд. м³. Золоотвалы для складирования таких объемов золошлаков, подверженных сильному пылению, при одновременном дефиците водного баланса в отечественной практике не формировались.

Решение проблемы предотвращения пыления золоотвалов возможно различными путями, однако каждый из них требует проведения соответствующих исследований с целью его надежности и эффективности. Метод, разработанный ВНИИГ им. Веденеева, заключается в периодическом закреплении поверхности намытого массива золошлаков путем разбрызгивания эмульсии латекса и битума или мазута с вертолетов. Однако этот метод непригоден для реальных условий экибастузских золоотвалов по причине высокой удельной стоимости при значительных объемах закрепительных работ, а также невысокой прочности закрепленной поверхности.

Более надежным является способ пылеподавления, предусматривающий подмешивание глинистой суспензии к золошлаковой массе [41]. Схема использования средств гидромеханизации для обеспечения пылеподавления на золоотвалах включает: разработку отвалов глинистых грунтов разреза "Северный" гидромониторно-землесосными установками; транспортирование глинистых грунтов посредством забойной землесосной установки типа 500-60М и перекачивающей станции; смешивание глинистой пульпы с золой в буферной емкости ГРЭС-1; гидротранспорт глинисто-золошлаковой смеси в отвал.

Разработка грунта может производиться двумя способами: встречным забоем из отвала "Северный" и из специально созданного навала глинистого грунта. Второй способ предпочтительнее, так как исключает увлажнение отвала "Северный" и не влияет на устойчивость его откосов, при этом в специальный "навал" может подаваться более качественный однородный глинистый грунт. По трудности разработки гидромониторами глинистый грунт из "навала" относится к IV и V группам. Удельный расход воды на разработку 1 м³ грунта составит 8—10 м³. Грунт из навала разрабатывается двумя гидромониторами ГМ-350 (расход до 4000 м³/ч) с дистанционным управлением. Гидротранспорт грунта осуществляется землесосами типа 500-60М (напор — 80 м; расход — 7200 м³/ч). По опыту

разработки глин на объектах КМА, по трубам диаметром 900 мм удельные потери напора по длине трубопровода для глинистых грунтов составляют 1,4—1,6 м на 100 м. При дальности транспортирования от забоя до буферной емкости ГРЭС-1, составляющей 10 км, потребуется одна перекачивающая станция. После смешивания глинистой пульпы с золошлаками дальнейший гидротранспорт глинисто-золошлаковой смеси производится по существующей системе, состоящей из двух трубопроводов диаметром 1200 мм.

Достоинствами предложенной схемы являются: улучшение перемешивания глинистых и зольных частиц за счет совместного гидротранспорта; применение проверенного в условиях месторождений КМА надежного способа разработки глинистых грунтов; высокая производительность гидромеханизированных работ; сокращение капитальных и приведенных затрат (отказ от земснаряда, разработка предварительно разрыхленных грунтов); уменьшение расхода электроэнергии за счет повышения концентрации гидросмеси.

Внедрение описанной схемы обеспечивает наряду с пылеподавлением также экономию водных ресурсов за счет исключения расхода воды на увлажнение поверхности пляжа и сокращения потерь на испарение.

Применительно к условиям карьеров, где формируются хребтовидные (конические) отвалы, МГИ предложена схема объединенного отвального хозяйства, предусматривающая использование намывных отходов обогащения для горнотехнической рекультивации отвальных насыпей путем выполнения следующих операций:

- создания дамб обвалования в пределах отвального массива и соответственно карт намыва;

- сравнения внутри карты намыва каждого отвального гребня с одной стороны до уровня одной из дамб обвалования и образования прорана с другой стороны, причем прораны соседних гребней создаются с противоположных сторон;

- устройства колодца в последней от выпуска пульпы межгребневой зоне карты намыва со стороны, противоположной прорану;

- монтажа магистрального и рабочего пульповодов;

- укладки намывного материала в межгребневом пространстве карты с перемещением выпуска рабочего пульповода вдоль секции (межгребневой зоны) по мере достижения проектных отметок заполнения;

- планировки остаточных породных конусов над намытой поверхностью или укладки почвенного слоя (в зависимости от направлений использования восстановленной территории).

Размеры карт определяются из условия осветления воды при движении пульпы. Одновременно на нескольких картах целесообразно производить различные виды работ: подготовку к складированию, укладку намывного материала, планировку поверхности отвала.

По сравнению с описанным в работе [38] способом переформирования конических и хребтовидных отвалов посредством намыва хвостов обогащения новый способ обладает следующими основными достоинствами: удлиняется путь фильтрации воды за счет зигзагообразного движе-

ния пульпы; обеспечивается равномерное фракционирование намывного массива в пределах секций; сокращаются сроки и затраты на подготовку поверхности отвалов для последующего использования.

Рассмотренная технология принята для внедрения на Вяземском горно-обогатительном комбинате, где отходы обогащения песчано-гравийной массы — глинистые пески намечено складировать в межгребневом пространстве сложенных четвертичными суглинками внутренних отвалов с целью подготовки для лесохозяйственного использования территории площадью более 300 га. Использование отходов обогащения позволяет исключить отвод новых земельных площадей для хвостохранилища. При этом также существенно снижаются затраты на рекультивацию отвалов и сроки выполнения этих работ.

Применение средств гидромеханизации для пылеподавления и рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ обеспечивает предотвращение загрязнения воздушного бассейна, уменьшение затрат на горнотехническую рекультивацию, сокращение сроков восстановления намывных территорий, вовлечение в сферу сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования дополнительных по отношению к первоначальным земельным отводам площадей.

VI.2. РАЗМЕЩЕНИЕ СУХИХ ОТВАЛОВ НА НАМЫВНЫХ ОСНОВАНИЯХ

Повышение вместимости гидроотвалов возможно за счет укладки на их территориях дополнительных объемов сухой вскрыши, доставляемой колесными видами транспорта. Размещение сухой вскрыши целесообразно осуществлять на гидроотвалах, расположенных вблизи карьеров, действующих экскаваторных или автомобильных отвалов, регламентируя порядок отвальных работ условиями безопасности и технико-экономическими расчетами.

Вопросы формирования отвальных насыпей на намывных основаниях рассматривались преимущественно для условий разрезов Кузбасса. В этом бассейне исследования условий отвалообразования на слабых основаниях проводились ВНИМИ, УкрНИИпроектом, МГИ [7, 43, 44]. Допустимые параметры отвальных откосов устанавливались с помощью натурных наблюдений, расчетов и центробежного моделирования. ВНИМИ выполнено геомеханическое обоснование технологии формирования сухих отвалов на гидроотвалах "Сагарлыкский", "Свободный" (разрез им. 50-летия Октября), "Акташский" (разрез им. Вахрушева), № 4 (разрез "Киселевский") и на ряде других намывных объектов. В качестве обязательных мероприятий при нагрузении гидроотвала рассматриваются [7]: удаление воды из пруда-отстойника до начала работ; наблюдения за динамикой порового давления в намывных основаниях; инструментальные наблюдения за величинами и скоростями смещения реперов наблюдательных станций; оценка коэффициента запаса устойчивости откосов.

МГИ определялись конструкция сухих отвалов и режим отвальных работ на намывных основаниях применительно к условиям разрезов "Краснобродский", "Колмогоровский" и "Кедровский". Направление развития, скорость подвигания отвального фронта и генеральный угол откоса (для многоярусных отвалов) при формировании отвальных насыпей на гидроотвалах устанавливались с учетом динамики роста несущей способности намывных оснований.

Для обоснования режима и технологических схем экскаваторного отвалообразования продолжительность периодов t_p достижения разрушающих скоростей сдвиговых деформаций u_p в тонкодисперсных грунтах намывных оснований определялась по следующей зависимости, базирующейся на положениях структурной механики грунтов:

$$t_p = \left(\frac{a\tau}{u_p} \right) \frac{1}{\delta}, \quad (VI.1)$$

где a и δ — эмпирические константы; τ — касательное напряжение.

Значения t_p определены для призм выпирания (выдавливания) при нормальном напряжении $\sigma_n = 0,1$ МПа и максимальном касательном напряжении $\tau = 0,013 + 0,019$ МПа ($< \tau_0$). При $\tau \geq \tau_0$ деформирование носит условно-мгновенный характер (т. е. выдавливание глинистого материала происходит практически одновременно с приложением нагрузки от отвальной насыпи).

Полученные данные использовались в качестве исходной информации при регламентировании режима отсыпки и конструкции сухих отвалов, размещаемых на намывных основаниях. В частности, рассматривалось отвалообразование с применением драглайна ЭШ-10/70 для северо-восточного участка гидроотвала "Новобачатский" разреза "Краснобродский" ПО "Кемеровоуголь". В рассматриваемых условиях целесообразно осуществлять последовательную нижнюю и верхнюю отсыпку двух ярусов отвала при прямом и обратном проходе экскаватора. Такая схема позволяет дважды использовать путь отвального тупика без его переноса с одновременным увеличением его приемной способности и исключает холостые проходы экскаватора. Протяженность фронта отвала колеблется от 1,5 км в начале ведения отвальных работ до 2 км — в конце. Отвал полускальных пород размещается преимущественно на территории ядерной зоны гидроотвала и лишь незначительной своей частью покрывает пляжную зону (см. рис. 34). Высота нижнего отвального яруса ($h_{о.я}$) составляет 20 м, но в связи с проседанием сухого отвала в намывные породы $h_{о.я}$ возрастает в пляжной зоне до 21 м и в ядерной — до 23 м. Опыт отвалообразования драглайнами на экскаваторных отвалах при железнодорожном транспорте показывает, что производительность ЭШ-10/70 применительно к условиям Кузбасса достигает 3000 тыс. м³/год, или 12300 м³/сут. Оптимальная ширина заходки A при отсыпке I яруса составляет для пляжной зоны 96 м, для ядерной 89 м. При шаге передвижки, равном 6 м,

драглайн отсыпает с одной стоянки объем породы, равный его суточной производительности.

При указанном режиме работы I ярус сухого отвала формируется за один год, а в течение второго и третьего года формируется II ярус при обратном проходе экскаватора. Скорость подвигания отвального фронта $v_{ф.о}$ составляет для пляжной зоны $v_{ф.о} \leq 48$ м/год, для ядерной $v_{ф.о} \leq 39,5$ м/год.

Расчетами устойчивости сухого отвала на намывном основании с применением ЭВМ ЕС-1033 установлено положение кривых скольжения с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости. Расчеты производились для вариантов размещения сухих отвалов в пляжной и ядерной зонах при степенях уплотнения намывного основания $U = 0,6 \div 1,0$. Исходные механические характеристики пород намывных оснований соответствуют средним минимальным значениям параметров сопротивления сдвигу для пляжных и ядерных зон, полученным на основе обобщения экспериментальных данных МГИ по гидроотвалам разрезов Кузбасса.

С учетом установленных значений t_p и параметров призмы обрушения B принятая технологическая схема отвалообразования обеспечивает скорость подвигания отвального забоя v_z , при которой экскаватор ЭШ-10/70 переходит на нагруженное сухим отвалом намывное основание через 7–8 сут после достижения критической скорости сдвиговых деформаций в приоткосной зоне. Таким образом, зона активного выдавливания намывных грунтов постоянно удалена от места стояния экскаватора не менее чем на 45 м.

При определении скорости подвигания фронта отвала $v_{ф.о}$, характеризующей сроки стояния откосов и продолжительность периодов их формирования, общая степень уплотнения намывного основания устанавливалась по принципу суперпозиции с учетом вида уплотняющих нагрузок. Продолжительность периодов уплотнения намывных масс определялась дифференцированно для отдельных заходов в пределах призмы возможного обрушения, причем минимальная общая (от собственного веса намывных грунтов и внешней нагрузки) степень уплотнения принималась для пляжных зон $U \geq 0,7$, для ядерных зон $U \geq 0,8$ с учетом влияния дренажных элементов.

Скорость подвигания фронта отвала $v_{ф.о}$ определялась для случаев нагружения намывного основания как одноярусными, так и многоярусными отвалами при максимальной длине пути фильтрации, равной средней мощности сильносжимаемых пород. По расчетным поверхностям скольжения на ЭВМ ЕС-1033 определялись коэффициенты запаса устойчивости отвальных насыпей на намывном основании. Результаты расчетов устойчивости многоярусных отвалов на намывных основаниях мощностью $h_{я} = 10 \div 40$ м при коэффициенте запаса устойчивости $\eta = 1,2$ представлены на рис. 59. Изменение величины генерального угла откоса отвала β_r производилось варьированием параметров отвала (ширины площадки B предотвала высотой h_n , высоты яруса, ширины берм и заходки). В связи с большой протяженностью отвального фронта (до 2 км) для гидроот-

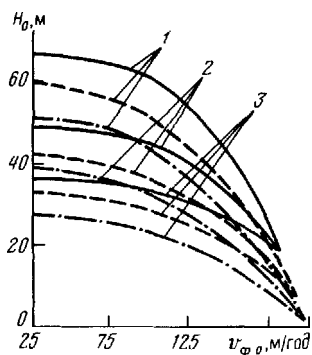


Рис. 59. Зависимости высоты отвала H_0 от скорости продвижения отвального фронта в ядерной зоне (Кузбасс) (сплошные, пунктирные и штрихпунктирные линии соответственно при $h_{я} = 10, 20, 40$ м):

1 — $\beta_T = 10^\circ$; 2 — $\beta_T = 15^\circ$; 3 — $\beta_T = 20^\circ$

валов разрезов Кузбасса наибольшую сложность представляет отсыпка I яруса сухих отвалов. Расчеты устойчивости отвалов при незавершенной консолидации намывных масс позволили определить максимальные скорости продвижения фронта при высоте отвального яруса $h_{о.я} = 10 \div 20$ м, размещаемого на намывном основании мощностью $h_{я} = 5 \div 40$ м.

Для кривых скольжения с минимальным коэффициентом запаса устойчивости произведены расчеты величины пригрузки намывного основания (параметров предотвала). По полученным результатам был построен график определения величины пригрузки для двух зон гидроотвала при различных степенях уплотнения намывного массива при $\eta = 1, 2$. График свидетельствует о необходимости пригрузки низового откоса отвала при расположении оборудования в пределах призм обрушения. Поэтому при отвалообразовании с применением автотранспорта возникает необходимость сооружения предотвала мощностью до 4,5 м и шириной до 30 м для обеспечения безопасности ведения отвальных работ, так как оборудование и обслуживающий персонал находятся в пределах призмы обрушения. При отвалообразовании с применением автотранспорта без пригрузки низового откоса предотвалом разгрузка должна производиться на расстоянии не менее 15 м от бровки отвала, и после стабилизации деформаций в зоне выдавливания дальнейшее перемещение породы должно осуществляться бульдозером. Отвальный фронт по периметру необходимо разделить на участки длиной 60–100 м, отвалообразование на которых происходит попеременно. Критическое состояние, при котором необходимо переносить отвалообразование на соседний участок, определяется следующими условиями: полным оконтуриванием оползневого клина трещиной отрыва на верхней площадке и образованием вала выпирания у нижней бровки откоса прогрессирующим характером деформирования откосов (происходит значительное нарастание скорости смещения).

Графики критических скоростей деформирования представлены в гл. VII.

Использование большегрузных автосамосвалов НД-1200 "Комацу" целесообразно в сочетании с драглайном ЭШ-10/70. При такой схеме экс-

каватор находится на расстоянии не менее 30 м от призмы возможного обрушения. Создание отвала или частичный транспорт пород вскрыши на отвале требуют значительного объема бульдозерных работ, что увеличивает стоимость отвальных работ по сравнению с отвалообразованием экскаваторами с применением железнодорожного или автомобильного транспорта. Для условий гидроотвала "Новобачатский" наиболее эффективным представляется комбинированное отвалообразование путем отсыпки 1-го и 2-го ярусов драглайнами ЭШ-10/70 с последующим применением автотранспорта.

Предлагается разделить гидроотвал № 3 разреза "Кедровский" на две секции отсечной дренажной призмой из полускальных пород вскрыши, создаваемой экскаватором ЭШ-10/70 или бульдозерами в сочетании с автотранспортом. В секциях одновременно ведется отсыпка сухого отвала "Пихтовский" (в ядерной зоне) и укладка гидровскрыши до полного заполнения чаши гидроотвала. Создание 1-го и 2-го ярусов сухого отвала производится экскаватором ЭШ-10/70, а последующих — с применением экскаваторов ЭКГ-4у и ЭКГ-8. После окончания намыва гидроотвала появляется возможность складирования пород сухой вскрыши в пределах пляжной зоны гидроотвала с применением автотранспорта, используемого при отсыпке сухого отвала на гидроотвале № 2. Необходимым условием является наличие линз с целью форсирования консолидации в пределах пляжной зоны, отсыпка которых осуществлялась разрезом "Кедровский" согласно рекомендациям МГИ. Для предотвращения оползневых деформаций дамбы гидроотвала необходимо создание бермы шириной 60–80 м, параметры которой были получены в результате расчета устойчивости дамбы гидроотвала на ЭВМ "Мир" для случая нагружения намывного массива отвальными ярусами.

Ю.Н. Малушицким рассматривались условия безопасной укладки сухих отвалов неразмокаемых пород на старых гидроотвалах на основании анализа результатов центробежного моделирования. Для постройки моделей были использованы материалы средних составов натуральной пульпы и смесей вскрышных пород (песчаника и алевролита). В моделях имитировалась также кора высыхания с помощью лоскутов брезента и листов промокающей бумаги. Линейные масштабы моделирования изменялись в пределах $1 \div 40 \div 1:200$ путем соответствующего разгона (нагружения) модели. Модельные эксперименты позволили изучить механизм деформирования с учетом угла наклона ($5-10^\circ$) намывных оснований мощностью 6–20 м при их нагружении отвалами высотой 20–40 м. Некоторые из разработанных рекомендаций сложно реализовать в конкретных условиях. К их числу относятся: подготовка основания путем нарезки прорезей или сплошного рыхления корки высыхания для предупреждения внезапного проседания отвальных насыпей; применение камуфлетных взрывов для ускорения отжима пульпы из-под "сухого" отвала; исключение возможности ведения работ в условиях развития оползневых деформаций [43].

В работах ВНИМИ [7, 32] применительно к условиям гидроотвалов Кузбасса обобщен опыт использования различных схем формирования

отвальных насыпей на намывных основаниях и рассмотрены условия безопасного ведения работ с учетом возможности развития оползневых деформаций, приводящих к частичному или полному выдавливанию намывных отложений из под отвала. Применительно к бульдозерному отвалообразованию условия достижения критического состояния, когда необходимо переносить отсыпку пород на соседний участок, рассматривались выше.

Работы на данном блоке могут допускаться при затухании деформаций. К числу основных правил безопасности при формировании первого яруса бульдозерного отвала относятся следующие:

бульдозер, выполняя планировочные работы, передвигается лишь перпендикулярно к верхней бровке яруса;

на верхней площадке отвального блока должны быть буксировочные средства (канаты) для аварийного транспортирования автосамосвалов, попавших в зону распространения оползня;

допускается одновременная разгрузка не более трех автосамосвалов для уменьшения их динамического воздействия;

на отвале обязательна телефонная или радиосвязь с начальниками горного участка или смены разреза.

Рекомендации ВНИМИ по отвалообразованию на гидроотвалах с применением драглайнов соответствуют рассмотренным выше положениям.

В НИИКМА разработаны эффективные способы формирования внешних отвалов в режиме управляемых оползневых деформаций. В основу этих способов положены результаты натурных наблюдений за оползневыми деформациями откосов отвалов пластичных пород на прочных основаниях, а также отвалов любого литологического состава на слабых естественных основаниях или гидроотвалах.

Первый способ предусматривает отсыпку отвального яруса двумя слоями с опорным гребнем высотой, равной $1,1-1,5$ предельной высоты откоса $H_{пр}$. Формирование верхнего слоя производится по челночной схеме. Длина каждого блока отвальной заходки принимается равной $60-100$ м. В результате обусловленного пластическими деформациями выполаживания опорного гребня отвальный ярус приобретает контуры, соответствующие физико-механическим свойствам складироваемых пород, и обеспечиваются безопасные условия работы оборудования. Применение этого способа в условиях карьеров КМА позволяет увеличить высоту отвальных ярусов на слабых основаниях от 7 до 15 м и на прочных основаниях — от 10 до 30 м (А.С. № 785490).

Второй способ предназначен для формирования отвальных ярусов высотой до 60 м в режиме быстрых блоковых обрушений приоткосных зон опорного гребня. Формирование отвала производится двумя способами с применением конвейерных отвалообразователей. Нижний слой отсыпают с опорным гребнем до высоты, не превышающей $1,5 H_{пр}$, и затем разгрузка отвальных масс производится на внешний откос опорного гребня до образования трещин отрыва (заколов). Обрушение пород носит блоковый характер и происходит при высоте опорного гребня $H_{гр} >$

$> 2,1H_{\text{пр}}$. Отсыпку пород на участке активных деформаций прекращают после выхода поверхности скольжения в середину внутреннего откоса опорного гребня. После отсыпки опорного гребня нижнего слоя в соответствии с приведенным ограничением на всю длину фронта работ отступающими заходками заполняют промежуток между опорным гребнем и откосом верхнего слоя (А.С. № 1008449).

Сущность способа отвалообразования на слабых обводненных основаниях (третий способ) заключается в том, что на основание экскаватором отсыпают до высоты $(1,2-2)H_{\text{пр}}$ опорный гребень (или опорный породный конус) и вызывают пластические деформации пород слабого основания (оползень выдавливания). Затем производят планировку деформирующегося опорного гребня с размещением пород в пределах отвальной заходки. После планировки экскаватор перемещают на верхнюю площадку опорного гребня, и цикл отсыпки пород повторяется. Этот способ позволяет на 50 % сокращать объем вспомогательных операций и на 10–15 % увеличивать производительность отвального оборудования (А.С. № 825955).

Четвертый способ предназначен для формирования отвальных ярусов с использованием экскаватора-мехлопаты. Опорный гребень создают в виде передового и боковых опорных конусов с опережающим формированием передового опорного конуса до уровня нижнего подступа. Производят подрезку внутренних откосов боковых конусов и укладку породы между этими конусами до создания сплошного опорного гребня. При складировании пород с различными прочностными свойствами в передовой опорный конус укладывают более прочные породы, а в боковые конусы — породы с пониженными прочностными характеристиками (до начала деформации откосов). После этого на слабые породы укладывают более прочные, а породы с пониженными прочностными характеристиками размещают между опорным гребнем и откосом верхнего подступа (А.С. № 1113547).

Новые способы отвалообразования прошли опытно-промышленную проверку на экскаваторных и конвейерных отвалах Михайловского и Стойленского ГОКов КМА, где в результате внедрения этих способов в производство достигнут экономический эффект около 1,5 млн. руб.

Использование основного технологического оборудования обеспечивает быстрое внедрение и высокую эффективность рассмотренной технологии формирования сухих отвалов на намывных основаниях.

Размещение сухих отвалов на гидроотвалах создает значительную экономию плодородных земель. Первостепенное значение с позиций безопасности отвальных работ в рассмотренных условиях приобретает оперативный геомеханический контроль системы "отвальная насыпь — намывное основание".

VI.3. УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С позиции горнодобывающих отраслей промышленности затраты на рекультивацию являются дополнительными по отношению к эксплуатационным или капитальным. Наряду с этим неиспользование нарушенных горными работами площадей для нужд сельского, лесного хозяйства и других целей влечет за собой народнохозяйственный ущерб. В общегосударственном масштабе как отсутствие продукции с нарушенных земель, так и рекультивационные расходы определяют снижение национального дохода государства.

С учетом вышеизложенного необходимо выполнять условие минимизации затрат:

$$C = C_K + C_{с.х}, \quad (VI.2)$$

где C_K — затраты карьера на горнотехническую рекультивацию гидроотвалов; $C_{с.х}$ — чистый доход, который не получен сельскохозяйственными предприятиями на отчужденной территории.

Из этого условия целесообразно определять продолжительность периодов "отдыха" и рекультивационных работ. Необходимо учесть, что естественным путем достаточная несущая способность гидроотвалов может быть достигнута за длительный период времени и соответственно при большом "ущербе" сельского хозяйства, при этом $C_K = 0$. Время "пассивного отдыха" для гидроотвалов тонкодисперсных грунтов может изменяться от 2–3 до 20–30 лет.

Поэтому для выбора рациональных мероприятий следует сопоставлять суммарные затраты и "ущерб" сельского хозяйства при консолидации намытых толщ естественным путем.

Для определения продолжительности рекультивации необходимо учитывать: период проведения горных работ по ускорению консолидации T (лет), удельные затраты на эти работы C_K (руб/га), удельную прибыль с 1 га земли $Z_{с.х}$, площадь гидроотвала S (га), время достижения массивом достаточной несущей способности после проведения специальных работ $t_{о.а.}$, разновременность затрат на работы по ускорению консолидации грунтов и "ущерба" от задолженных земель. Последний фактор учитывается введением в расчеты временного лага $E_{вр}$.

Тогда, раскрывая суммарные затраты C , получаем следующее выражение затрат за период от начала рекультивационных работ до момента сдачи гидроотвала в использование сельским или другим хозяйством:

$$C = \sum_{t=1}^{t=T} \frac{S_T C_K}{T} \frac{1}{(1+E_{вр})^{t-1}} + \sum_{t=1}^{t=T-1} (S - \frac{tS}{T}) \times \\ \times Z_{с.х} (1+E_{вр})^{t+t_{о.а}-1} + \sum_{t=1}^{t=t_{о.а}} S Z_{с.х} (1-E_{вр})^{t-1} \text{ руб.}, \quad (VI.3)$$

где S_{Γ} — площадь гидроотвала, подлежащая рекультивации специальными методами; t — время в годах до момента окончания "пассивного отдыха"; $E_{вр}$ — временной лаг, равный 0,08.

После преобразования:

$$C = \frac{S_{\Gamma} C_K}{T} \sum_{t=1}^{t=T} \frac{1}{1,08^{t-1}} + S Z_{с.х} \sum_{t=1}^{t=t_{о.а}} 1,08^{t-1} + \frac{S C_K}{T} \sum_{t=1}^{t=T-1} (T-t) 1,08^{t+t_{о.а}-1}, \text{ руб.} \quad (VI.4)$$

В этом выражении все затраты приводятся к периоду окончания работ по отвалообразованию.

Анализ выражения (VI.4) показывает, что первое слагаемое характеризует затраты карьера на обеспечение достаточной несущей способности массива. Увеличение периода проведения рекультивационных работ T уменьшает затраты на эти работы при приведении их ко времени окончания намыва. Второе и третье слагаемые определяют неполученный доход сельского хозяйства: второе слагаемое определяет неполученный доход сельского хозяйства за время проведения рекультивационных работ и отражает постепенное убывание неполученного дохода; третье слагаемое определяет неполученный доход сельского хозяйства за время "активного отдыха" гидроотвала, т. е. после окончания использования спецметодов. Эти затраты, приведенные к тому же моменту времени, увеличиваются с ростом T . Суммарные затраты C как функция T в зависимости от стоимостных параметров C_K и $S Z_{с.х}$ могут быть монотонно возрастающими с минимальным значением, соответствующим какому-либо году, или монотонно убывающими в анализируемый период ($T = 20-30$ лет).

Удельные затраты карьера на рекультивацию C_K представляют собой дополнительные затраты на доставку и укладку материала дренажных элементов в гидроотвал.

Для анализа числовые значения C_K приняты равными 2500, 5000, 10000 руб./га. По статистическим данным прибыль с 1 га земли ($Z_{с.х}$) укрупненно равна: 150–200 руб. для пашни с высокой урожайностью; 80–100 руб. для пашни со средней урожайностью и 20–25 руб. для территорий, используемых под сенокос.

Начало работ по рекультивации и период этих работ T определяются прежде всего из соотношения суммарных затрат $C = C_K + S Z_{с.х}$ и затрат, соответствующих естественной консолидации массива или "пассивному отдыху" гидроотвала $T_{оп}$, равного 19 лет.

Если все точки кривой (рис. 60) суммарных затрат находятся выше затрат, соответствующих "пассивному отдыху", то, очевидно, ценность земель незначительна, а затраты на рекультивацию относительно велики, поэтому целесообразна естественная консолидация массива.

Если кривая суммарных затрат имеет минимум, затраты при котором меньше суммарных затрат при "пассивном отдыхе", то соответствующий этому минимуму период T определяет экономически наивыгоднейший

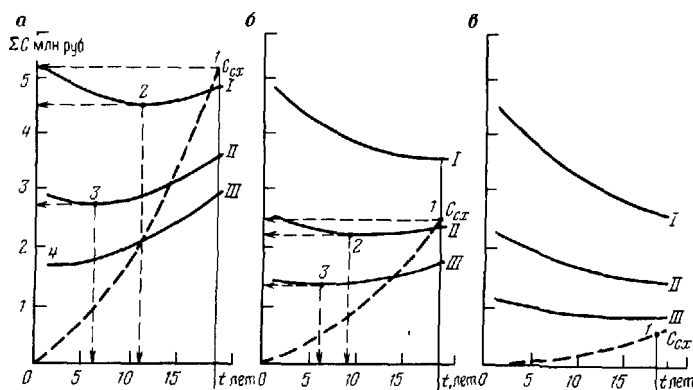


Рис. 60. Зависимости суммарных затрат на горнотехническую рекультивацию C_K (сплошные линии) и потерь сельского хозяйства $C_{с.х}$ (пунктирные линии) при $C_K = 10, 5, 2,5$ тыс. руб/га (I, II, III) от продолжительности рекультивации:

а — $z_{с.х} = 200$ руб/га; б — $z_{с.х} = 100$ руб/га; в — $z_{с.х} = 25$ руб/га

период рекультивационных работ. В случае, если кривая суммарных затрат монотонно возрастает, а величина затрат при малых T меньше затрат при $T_{0.п}$, необходимо проведение рекультивационных работ в кратчайшие сроки — теоретически за 1 год.

Варианты расчетов по определению рациональных сроков рекультивации гидроотвала приведены на графиках рис. 60 и 61. Например, для гидроотвала время "пассивного отдыха" составляет 19 лет, время "активного отдыха" — 4 года. При условии, что отчужденные земли могли бы давать доход 200 руб/га, ущерб сельского хозяйства при "пассивном отдыхе" равен 5,2 млн. руб. (см. рис. 60, а, точка 1). При затратах карьера по форсированию консолидации $C_K = 10$ тыс. руб/га рациональное время рекультивационных работ должно составить 11 лет, что определяет суммарные затраты 4,55 млн. руб. (см. рис. 60, а, точка 2), а приведенный к моменту начала рекультивационных работ экономический эффект по сравнению с "пассивным отдыхом" может быть равен $5,2 - 4,55 = 0,65$ млн. руб. При

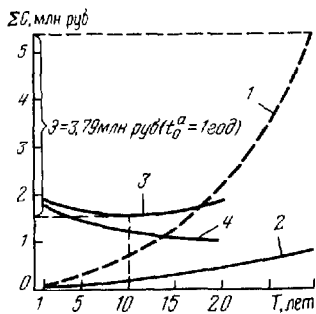


Рис. 61. Зависимости затрат на рекультивацию ΣC от продолжительности "пассивного отдыха" (1, 2 — соответственно при $z_{с.х} = 200; 25$ руб/га) и от продолжительности рекультивационных работ (3, 4 — соответственно при $z_{с.х} = 200; 25$ руб/га)

затратах карьера $C_K = 5$ тыс. руб/га оптимальная продолжительность рекультивации — 6 лет (см. рис. 60, а, точка 3), суммарные затраты на рекультивацию 2,6 млн. руб., а экономический эффект составит 3,5 млн. руб. (см. рис. 60, а, точка 4).

В случае если отчужденные земли могли бы давать за период намыва и последующий за этим период доход от сельскохозяйственной продукции 100 руб/га, то при "пассивном отдыхе" за период 19 лет "ущерб" сельского хозяйства составил бы 2,55 млн. руб. (см. рис. 60, б). При этом если затраты разреза $C_K = 10$ тыс. руб/га, то более выгодно осуществить такие затраты для получения соответствующего народнохозяйственного эффекта и привести эти работы за период 9 лет (см. рис. 60, б, точка 2). При малопродуктивных землях, занятых под гидроотвал ($Z_{с.х} = 25$ руб/га) (см. рис. 60, в), не возникает экономической необходимости в проведении работ по ускорению консолидации, так как "ущерб" сельского хозяйства при "пассивном отдыхе" составляет 0,7 млн. руб. (см. рис. 60, в, точка 1), что ниже по сравнению с затратами по вариантам, соответствующим $C_K = 2,5 - 5,0 - 10$ тыс. руб/га.

Приведенная выше математическая модель рекультивации гидроотвала составлена из допущения, что количество секций равно T . В этом случае линии на графиках, характеризующие затраты, аппроксимируются гладкими линиями. В случае если количество секций меньше T , то зависимости экономического характера имеют вид ломаных линий.

Применительно к одной из секций гидроотвала площадью S при количестве секций n формула (VI.4) принимает вид:

$$C = \sum_{t=1}^{t=T} \frac{SC_K}{T} \frac{1}{(1+E_{вр})^{t-1}} + \sum_{t=1}^{t=T-1} (nS - \frac{tS}{T}) \times \\ \times Z_{с.х} (1+E_{вр})^{t+t_{о.а}-1} + \sum_{t=1}^{t-t_{о.а}} SZ_{с.х} (1+E_{вр})^{t-1}, \text{ руб.} \quad (\text{VI.5})$$

При увеличении n второе слагаемое растет, но наряду с этим уменьшается при специальных мероприятиях по ускорению консолидации период проведения работ по рекультивации — величина T . В общем виде приведенная зависимость имеет минимум, нахождение которого зависит от количества секций n и времени T .

Применительно к гидроотвалу "Березовый Лог" расчеты показывают, что при создании системы дренажных элементов в ядерной зоне при средней площади секций 250 га $t_{о.а} = 1$ год и оптимальное время проведения горнотехнической рекультивации $T = 10$ лет, что обеспечивает получение экономического эффекта по сравнению с вариантом "пассивного отдыха" $(5,3-1,6) = 3,7$ млн. руб. (см. рис. 61).

С учетом реальных возможностей выполнения работ по созданию дренажных элементов, укладке рекультивируемой вскрыши (суглинка) и чернозема, а также с учетом народнохозяйственного и социального эффектов от рекультивации в бассейне КМА период рекультивации секции снижается до 4–5 лет.

Для детального обоснования режима рекультивационных работ необходимо располагать зависимостями расстояния между дренажными и отсечными призмами и объемом фильтрующего материала, мощностью ядерной зоны, темпом намыва гидроотвала, а также характеристиками уплотняемости и сопротивления сдвигу тонкодисперсных масс с учетом их изменчивости в пределах территории гидроотвала.

Таким образом, при обосновании мероприятий по повышению вместимости и ускоренному восстановлению территорий гидроотвалов необходимо:

а) выполнить инженерно-геологическое районирование территорий гидроотвалов;

б) определить допустимые геометрические размеры упорных призм с учетом взаимосвязи между динамикой формирования намывных массивов тонкодисперсных пород и параметрами конструктивных элементов откосных сооружений;

в) установить область развития действующего гидроотвала с учетом изменения затрат на гидроотвалообразование в зависимости от времени функционирования гидроотвала (и соответственно его высоты и темпа намыва) и затрат на транспортировку гидросмеси (с использованием динамической экономико-математической модели);

г) установить период горнотехнической рекультивации гидроотвалов на основе сопоставления затрат в зависимости от продолжительности "отдыха" намывных толщ для вариантов отсутствия и проведения мероприятий по форсированию консолидации массивов тонкодисперсных пород.

ГЛАВА VII

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ

VII.1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Основные задачи геомеханического контроля намывных массивов обозначены в структурной схеме на рис. 5. Контроль носит комплексный характер и предусматривает использование как лабораторных, так и натурных методов. Достоверная картина "жизни" намывного массива может быть получена в результате обобщения непрерывно поступающей натурной информации. Использование натурных методов исследований позволяет исключить или существенно снизить влияние факторов, искажающих показатели свойств грунтов в образце.

Контроль намывных массивов должен обеспечивать:

1) определение положения депрессионной кривой для различных моментов времени;

2) определение показателей водно-физических свойств и гранулометрического состава намывных грунтов;

3) получение характеристик деформируемости и сопротивления сдвигу грунтов тела и оснований гидросооружений;

4) определение вертикальных и горизонтальных смещений ограждающих дамб и внутренних зон намывных массивов;

5) оценку устойчивости откосов дамб для различных этапов возведения сооружений;

6) установление несущей способности намывных грунтов.

Однако применяемые средства и методы контроля намывных горно-технических сооружений не всегда обеспечивают оперативную оценку состояния массива с учетом динамики их возведения. Основные недостатки в постановке геомеханического контроля следующие:

определение преимущественно водно-физических характеристик намывных грунтов;

ограничение сети гидрогеологических наблюдений использованием пьезометров;

низкий уровень инструментальных наблюдений (недостаточная частота и точность замеров вертикальных и горизонтальных деформаций);

практически не контролируемое состояние ядерных зон гидроотвалов;

отсутствие мобильных средств контроля;

малочисленность и недостаточная квалификация обслуживающего персонала контрольной службы.

Необходимым условием эффективности контроля является последовательная реализация следующих принципов:

непрерывности (в ходе многоэтапного процесса построения расчетной модели объекта уровень ее точности возрастает от этапа к этапу),

адаптации (расчетная модель и контрольная система взаимно приспособляются в соответствии с новой информацией и перестроенной моделью),

обратной связи (эффективность контроля и наблюдений зависит от степени учета требований, вытекающих из предполагаемого напряженно-деформированного состояния массива).

Из перечисленных принципов вытекает идея самообучающегося эксперимента, осуществление которого имеет решающее значение для оптимизации состава и объема натурных наблюдений и экспериментов [28].

Меры по контролю состояния намывных сооружений рассматриваются в работах инструктивного и методического характера, посвященных вопросам проектирования, возведения и эксплуатации гидроотвалов, хвостохранилищ, плотин [20, 32, 45]. В качестве главной задачи контроля указывается установление соответствия реальных условий возведения и эксплуатации намывных сооружений проектным преимущественно с позиций оценки устойчивости откосов ограждающих дамб или плотин. Контроль состояния намывных массивов применительно к решению задач повышения вместимости гидроотвалов и рекультивации их территорий рассматривался в работах МГИ и ВНИИ [7, 32, 34, 44].

Повышение оперативности контроля различных участков намывных

массивов возможно путем исследования свойств грунтов: а) в стенках скважин; б) при внедрении в массив специальных зондов, обеспечивающих в процессе их погружения непрерывное получение комплексной информации о свойствах грунтов.

К числу методов, требующих предварительной проходки скважин, относятся: прессиометрия, вращательный срез (для грунтов ненарушенной структуры), радиоизотопные, электрические, сейсмоакустические, термометрия.

Прессиометрические исследования намывных отложений пляжных зон гидроотвалов разрезов Кузбасса проводились сотрудниками ВНИМИ с использованием прессиометра ПГР-108 конструкции Армгипроводхоза [7]. Исследования механических свойств четвертичных суглинков в основании гидроотвала Михайловского ГОКа (КМА) выполнялись сотрудниками МГИ с помощью прессиометра Д-76 конструкции НИИОСП. Полученные из прессиометрических испытаний по приближенному способу ВСЕГИНГЕО характеристики сопротивления грунтов сдвигу близки к показателям, определяемым в стабиометрах при неконсолидированно-недренированных испытаниях.

Однако большая трудоемкость и ограниченная глубина измерений не позволяют считать прессиометры указанных типов эффективным средством оперативного контроля состояния массива.

Большее распространение на гидроотвалах получил метод вращательного среза, который для значительной части ядерных зон применяется с непосредственным задавливанием крыльчатого зонда (без бурения скважин) [7, 17].

Сопротивление вращательному срезу определяется из выражения

$$\tau_k = M_{\max}/C_1,$$

где M_{\max} — максимальный внешний момент.

Константа C_1 определяется при погружении крыльчатки диаметром D и высотой H на глубину $h > 2H$ из следующих выражений:

а) для крыльчатого наконечника

$$C_1 = \pi D^2/2(D/3 + H);$$

б) для комбинированного наконечника

$$C_1 = \frac{\pi D^2}{2} \left[\frac{1}{6} (D - d_{\text{кон}}^3/D^2) + H_{\text{кр}} \right],$$

где $d_{\text{кон}}$ — диаметр основания конического наконечника датчика ШПД.

Показатель структурной прочности при срезе определяется из выражения

$$P_{\text{стр}} = M_{\max}/M_{\min}.$$

При задавливании крыльчатого зонда в намывные грунты максимальные M_{\max} и минимальные M_{\min} значения крутящего момента уменьшаются на величину, обусловленную трением штанг о породу. Структурная прочность грунта $P_{\text{стр}}$ оценивается по величине $P_{\text{стр}}$ следующим образом:

$P_{стр} = 1$ — отсутствует; $1 \div 2$ — низкая; $2 \div 5$ — средняя; 5 — высокая. Для перехода от результатов натурных испытаний методом вращательного среза к результатам лабораторных испытаний на приборах одноплоскостного среза для намывных грунтов гидроотвалов Кузбасса ВНИМИ предлагает использовать следующие понижающие коэффициенты: $0,59-0,67$ — для пляжных зон; $0,67-0,77$ — для переходных зон; $0,83-1,0$ — для ядерной (прудовой) зоны.

Исследованиями МГИ и ВНОГЕМА установлено, что при использовании универсальных стабилометров УСВ-2, обеспечивающих фиксацию заданной (соответствующей натурной) степени уплотнения образца в момент его разрушения, достигается хорошая сходимость результатов вращательных срезов и стабилометрических испытаний.

Внедрение натурных замеров порового давления в практику контроля состояния намывных массивов на горных предприятиях осуществлялось МГИ, ВНИМИ, Армнипроцветметом, НИИКМА. Наибольший объем измерений на объектах различных отраслей горнодобывающей промышленности выполнен МГИ, которым использовалась аппаратура конструкции Гидропроекта [17, 21, 34, 44].

Для изучения напряженного состояния грунтов применялись датчики-пьезодинамометры, в которых использован струнный метод измерения малых деформаций (пьезодинамометры ПД-4, ПД-6, ПД-10 диаметром 115 мм, высотой 65 мм для давлений соответственно до 0,4; 0,6 и 1,0 МПа, пьезодинамометры ДДС-3п, ДДС-10п, ДДС-30п диаметром 33 мм, высотой 125 мм для давлений соответственно 0,3; 1,0 и 3,0 МПа, штанговые пьезодинамометры ШПД-6, ШПД-10 диаметром 36 мм, высотой 250 мм для давлений соответственно 0,6 и 1,0 МПа, грунтовые динамометры ГД-4, ГД-10 диаметром 100 мм, высотой 30 мм для нагрузок соответственно до 0,4 и 1,0 МПа в комплексе с регистрирующими приборами типа ЦС-5м, ЧСД, ППП-1). Основные достоинства данной аппаратуры — высокая точность показаний, простота, компактность, незначительная потребность в поровой воде. Грунтовые динамометры используются для определения общего давления отвальных пород (сумма давления воды P_w и эффективного $P_{эф}$ давления, воспринимаемого минеральным скелетом грунта). Приборы закладывались в основание гидроотвалов для контроля роста нагрузки при намыве.

Для массовых замеров порового давления P_w в глинистых грунтах наиболее пригодны штанговые пьезодинамометры, позволяющие осуществлять как зондирование, так и стационарные измерения порового давления. В процессе экспериментальных исследований была разработана конструкция оголовков штанговых пьезодинамометров, обеспечивающая эффективное извлечение их и многократное использование при стационарных замерах. Создана также конструкция кассетного зонда для одновременного измерения порового давления в точках, расположенных на различных глубинах, что обеспечивает двух-трехкратное ускорение определения степени уплотнения глинистых слоев за счет сокращения затрат времени на стабилизацию показаний штанговых пьезодинамометров после

их задавливания. Порядок проведения натурных измерений с применением струнной аппаратуры уточнялся с учетом специфики формирования намывных горнотехнических сооружений: устанавливался режим зондирования намывных масс и оснований различного литологического состава; оценивалась инерционность замеров пьезодинамометров и грунтовых динамометров в зависимости от условий их закладки.

Совершенствование техники и уточнение порядка проведения натурных замеров позволили получить исходные данные о состоянии отвальных массивов и разработать методические основы их интерпретации. Оценка напряженного состояния обводненных отвальных массивов при помощи струнной аппаратуры открывает широкие возможности для оперативного контроля устойчивости откосных сооружений.

В состав стационарных наблюдений входили инструментальные замеры смещений контуров откосных сооружений и приоткосных зон намывных массивов, измерения порового и общего давления в водонасыщенных грунтах, определение плотности и влажности намывных отложений глубинным гамма-плотномером (ГГП-1) и нейтронным измерителем влажности (НИВ-1) [7]. Для определения приведенного коэффициента сжимаемости тонкодисперсных слабоструктурных грунтов в МГИ разработана методика, основанная на измерении смещения контура измерительных камер, которые создаются по способу ВНИИпромгаза (А.С. № 220 196). При использовании этого способа в исследуемых слоях в скважины помещают сферические или цилиндрические закладные элементы из растворимого материала (каменной соли), заключенные в эластичную водонепроницаемую оболочку (например, из латекса). После стабилизации пегростатической нагрузки производят выщелачивание закладного элемента и затем определяют среднее смещение контура измерительной камеры (с помощью контроля объема вытесняемой воды или путем измерения объема камеры специальным каверномером).

Модуль деформации грунтов E определяется из следующих соотношений:

для сферической камеры

$$E = \frac{r_1 H}{\Delta r} [\gamma(1 + \nu) - 3\gamma_B(1 - \nu)];$$

для цилиндрической камеры

$$E = \frac{r_1 H}{\Delta r} [\gamma(1 + \nu) - 2\gamma_B],$$

где r_1 — начальный радиус камеры; Δr — смещение контура камеры; H — глубина заложения камеры; γ — плотность грунта; γ_B — плотность воды; ν — коэффициент Пуассона грунтов.

Переход от модуля деформации E к компрессионному модулю $E_{ок}$ и соответственно к величине a_0 производится по соотношению

$$E = E_{ок} \frac{(1 - \lambda)(1 + 2\lambda)}{(1 + \lambda)} = E_{ок} \beta' = \frac{\beta'}{a_0},$$

где λ — коэффициент бокового распора грунтов.

В формулах для расчета E учтено противодействие воды в камерах ($\gamma_w H$). Коэффициент Пуассона ν определяется из испытаний в стабилометрах через коэффициент бокового распора.

Предложенный метод по своей сущности является "пассивно-прессиометрическим". Его преимущество состоит в том, что процесс деформирования пород происходит при их реальном напряженном состоянии. Метод апробирован на гидроотвале "Березовый Лог", где создавались цилиндрические камеры в глинисто-меловых линзах песчаной упорной призмы.

Наиболее перспективным из методов второй группы, не требующих предварительной проходки скважин, является пенетрационный каротаж [46].

Комплексирование методов пенетрации и радиоактивного каротажа позволяет получить в натурных условиях данные, необходимые для оценки возможностей размещения сухих отвалов на гидроотвалах и решения ряда других задач. Комплексное зондирование песчано-глинистых пород целесообразно выполнять с помощью самоходных установок, пригодных для вдавливания штанговых пьезодинамометров, пенетрометров-крыльчаток, каротажных зондов. Наиболее совершенной по техническому исполнению установкой этого типа является разработанная СКБ Министерства геологии СССР телеметрическая пенетрационно-каротажная станция (СПКТ), которая обеспечивает вдавливание зондов на глубину более 30 м с осевой нагрузкой до 19 т и позволяет получать данные о влажности и плотности пород, литологическом разрезе, боковом и лобовом сопротивлении задавливанию зонда. Производительность СПКТ — до 200 м/смену. Благодаря внедрению комплексного зондирования сводится до минимума объем бурения и получаются наиболее объективные данные о свойствах пород.

Сравнительно простым методом изучения состояния намывных масс гидроотвалов и хвостохранилищ является статическое зондирование, по результатам которого судят об однородности техногенных грунтов, их физико-механических свойствах и ориентировочно устанавливают границы внутренних зон этих сооружений. Для гидроотвалов Кузбасса ВНИМИ получена следующая зависимость между сопротивлением вращательному срезу τ ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$) и удельным сопротивлением задавливанию τ ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$) конуса с площадью основания 10 см^2 и углом при вершине 60° :

$$\tau = 0,073q_0 - 0,002q_0^2.$$

Сопротивление сдвигу q и удельное сопротивление задавливанию зонда τ изменялись соответственно в следующих пределах (МПа): 0,02—1,4 и 0,008—0,07. Для глинистых намывных грунтов выделены зоны с текучей, текучепластичной ($q_0 \leq 1,0 \text{ МПа}$) и мягкопластичной консистенцией ($q_0 > 1,0 \text{ МПа}$) [32].

По величине удельного сопротивления внедрению конуса при статическом зондировании производят расчленение намывных массивов хвосто-

хранилищ на инженерно-геологические элементы, представленные условными песками, супесями и суглинками. В.М. Малаховым изложены результаты статического зондирования хвостохранилища предприятия по добыче и переработке серы применительно к вопросам наращивания ограждающих дамб и последующего использования намывной территории.

Для предварительного оконтуривания зон намывных массивов могут также использоваться установки динамического зондирования УБП-15м. После определения зон распространения слабейшего намывного основания с помощью УБП-15м детальный анализ состояния намывных масс может производиться путем статического зондирования. Следует отметить целесообразность преимущественного применения динамического зондирования для исследования намывных масс хвостохранилищ, так как этот метод используется в основном для определения свойств раздельнозернистых или маловодонасыщенных связных грунтов.

В МГИ разработан комбинированный зонд, включающий поворотную крыльчатку и штанговый пьезодинамометр (А.С. 1174525).

Задавливание зонда на глубину свыше 50 м в намывные глинистые грунты и естественные основания производится самоходными буровыми установками (УГБ-100 м, УКБ-500 и др.).

Установка для зондирования грунтов (рис. 62, а) включает смонтированную на автомобиле стрелу 1 с установленным на ней гидравлическим цилиндром вдавливания 2 зонда 3, закрепленного на штанге 4, которая соединяется с головкой 5 для создания и измерения крутящего момента, через которую проходит кабель 6, подключаемый к измерителю (частотомеру) 7 порового давления; для крепления установки и восприятия реактивной нагрузки вдавливания имеются два винтовых анкера 8.

Зонд 3 (рис. 62, б) состоит из корпуса 9 с внутренней резьбой по его концам и в средней части для закрепления конического наконечника 10,

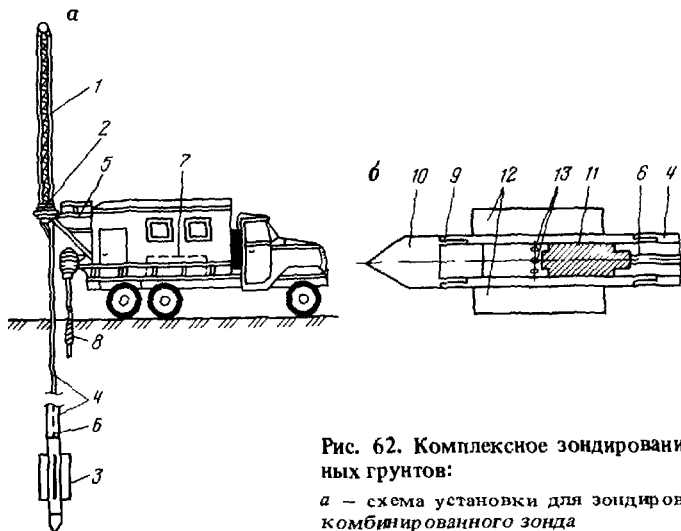


Рис. 62. Комплексное зондирование водонасыщенных грунтов:

а — схема установки для зондирования, б — схема комбинированного зонда

датчика порового давления 11 с кабелем 6 и штанги 4, наваренных на корпус продольных лопастей 12, между которыми по диаметру корпуса выполнена перфорация 13 под пористый камень датчика порового давления.

Применение зонда обеспечивает одновременное получение информации о сопротивлении сдвигу и степени уплотнения исследуемых породных толщ, а также позволяет выполнять оперативную оценку несущей способности слабых оснований и устойчивости откосов бортов и отвалов, сложенных песчано-глинистыми породами.

В новой сухолуптной буровой установке информационного назначения (СБИ), разрабатываемой ВСЕГИНГЕО, предусматривается использование в качестве сменного зонда устройства, предложенного МГИ. Базовым способом проходки в этой установке будет бурение или сочетание его с зондированием, что даст возможность изучать породы различных инженерно-геологических классов. Применение зондировочных установок в сочетании с буровыми позволяет контролировать состояние упорных призм, сложенных обломочным материалом различной крупности. Для обработки данных пенетрационного каротажа предусмотрено оснащение установки СБИ мини-ЭВМ.

Неотъемлемым элементом контроля устойчивости откосов ограждающих дамб или откосов сухих отвалов на намывных основаниях является определение деформаций (смещений) отвальных массивов с применением инструментальных наблюдений. С использованием структурно-механического подхода (см. разд. II.3) становится возможным определять критические скорости деформаций для реперов, размещенных в различных точках приоткосных массивов, сложенных или подстилаемых глинистыми грунтами.

Эффективным инструментом инженерно-геологического районирования намывных массивов является аэрофотосъемка. Для дистанционного геомеханического контроля труднодоступных зон намывных территорий МГИ совместно с ВИОГЕМОм предложено применять аэрофотограмметрическую съемку, интерпретация данных которой отличается тем, что по изолиниям относительных осадок строятся изолинии допустимых внешних нагрузок на намывной массив (А.С. 1188322).

VII.2. СХЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

На основе оперативной и надежной информации о физико-механических свойствах породных масс становится возможным повысить эффективность возведения намывных сооружений путем разработки действенных мер по управлению состоянием намывных толщ и обеспечению устойчивости дамб.

Наиболее представительные контрольные мероприятия выполнены на гидроотвале "Березовый Лог", где Украинским отделением Гидропроекта и привлеченными им организациями осуществлен комплекс инженерных изысканий, исследований и проектных проработок в рамках технического проекта гидроотвала и технорабочего проекта его рекультива-

ции. В техническом проекте детально разработаны схемы контрольных наблюдений (раздел "Контрольно-измерительная аппаратура"). Теоретическим обоснованием проектных решений по подготовке ядерной зоны гидроотвала к рекультивации путем создания в толще тонкодисперсных грунтов намывных дренажных элементов послужили исследования МГИ, который также осуществлял разработку и внедрение стационарного и мобильного геомеханического контроля, включающего систему стационарного контроля порового давления и комплексное зондирование тела и основания гидроотвала.

Для оперативного дистанционного контроля устойчивости внешних откосов гидроотвалов глинистых и смешанных пород целесообразно использовать систему датчиков-пьезодинамометров, заложенных по возможным поверхностям скольжения. В раздельнозернистых грунтах эти датчики служат для определения пьезометрических уровней, в тонкодисперсных породах — для замера порового давления. После установления датчиков и снятия первой серии показаний производят расчет устойчивости откосов с использованием натурных данных. Затем выполняют расчеты устойчивости для вариантов, соответствующих различным положениям депрессионной кривой и степеням уплотнения (слоев глинистых пород), которые принимают выше или ниже установленных при первичных замерах. На основании результатов расчетов устойчивости строят номограммы для определения коэффициентов запаса устойчивости при последующих замерах в зависимости от положения депрессионных кривых и степени уплотнения глинистых пород в основаниях расчетных блоков.

Коэффициент запаса устойчивости определяют по методу алгебраического суммирования сил по поверхности скольжения или многоугольника сил.

Таким образом, становится возможным определить коэффициент запаса устойчивости откосов непосредственно на наблюдательном посту путем "обхода" измерительных точек на коммутаторе приемного устройства — частотомера и подбора соответствующих вариантов по номограмме.

Конкретные схемы контроля устойчивости дамб и состояния различных участков намывных массивов разработаны для гидроотвалов "Березовый Лог", "Бековский" (разрез им. 50-летия Октября), "Южный" (разрез "Колмогоровский"), "Новобачатский" (разрез "Краснобродский"), "Прямой Ускаг" (разрез "Новосергеевский"), гидроотвалов карьера "Стрелица" (СОЗ), гидроотвалов-хвостохранилищ Вяземского ГОКа, Терелесовского, Питкярантского и Мансуровского карьероуправлений Главмоспромстройматериалы и Главмособлстройматериалы.

На рис. 41, 42 представлены схемы контроля устойчивости упорных призм и номограммы $\eta = f(S_{p.w})$, реализованные на гидроотвалах "Березовый Лог", "Бековский" и "Прямой Ускаг".

Предложенная система натурного контроля намывных горнотехнических сооружений предусматривает использование стационарной сети датчиков общего и порового давления в сочетании с зондированием породных масс тела и основания гидроотвалов комбинированным зондом МГИ. За-

давливание зонда осуществляется самоходными буровыми установками. Применение этой системы обеспечивает оперативное получение следующей информации:

текущих значений коэффициента запаса устойчивости упорных призм; степени уплотнения тела и основания гидроотвалов; несущей способности (допустимых внешних нагрузок) намывных масс;

пространственного положения отдельных зон намывных массивов.

При формировании отвальных насыпей песчано-глинистых пород на намывных основаниях для контроля их устойчивости также можно использовать методы зондирования. Для оперативного определения численных значений η с использованием полученных при зондировании величин общего сопротивления сдвигу (при вращательном срезе) или сцепления и угла внутреннего трения (при прессиометрических испытаниях) следует построить номограммы, с помощью которых можно получать значения η в зависимости от площади эпюры удерживающих касательных напряжений (S_{τ_n}) или суммы удерживающих сил по поверхности скольжения ($\Sigma F_{уд}$) для заданных геометрических параметров отвальных насыпей. Для построения номограмм предварительно выполняют расчеты устойчивости методами касательных напряжений или алгебраического суммирования действующих по вероятной поверхности скольжения сил. Для сложенных сильносжимаемыми водонасыщенными породами отвальных оснований контроль устойчивости должен предусматривать определение площади эпюры порового давления S_{p_w} (по данным стационарных замеров или зондирования штанговыми пьезодинамометрами). В этом случае величина η устанавливается в зависимости от площадей S_{τ_n} (или $\Sigma F_{уд}$) и S_{p_w} (расчетные параметры C и φ грунтов основания определяются по эффективным напряжениям).

Коэффициент запаса устойчивости отвальной насыпи на намывном основании определяется из выражения

$$\eta = \frac{S_{\tau}^H + \operatorname{tg} \varphi_{к.и} \sum_{i=1}^k \frac{(\sigma_{n_i} - P_{w_i}) + (\sigma_{n_{i-1}} - P_{w_{i-1}})}{2} l_i + C_{к.о} \sum_{i=1}^k l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\tau_{сд_{i-1}} + \tau_{сд_i}}{2} l_i},$$

где S_{τ}^H — площадь эпюры удерживающих касательных напряжений (сопротивление вращательному срезу) в теле насыпи; $\varphi_{к.о}$, $C_{к.о}$ — характеристики сопротивления сдвигу консолидированных грунтов основания; P_{w_i} — значения порового давления, определенные зондированием; $\tau_{сд}$ — сдвигающие касательные напряжения по поверхности скольжения, полученные расчетным путем.

Рекомендациями ВНИМИ предусматривается, что при отсутствии полного выдавливания намывных грунтов из-под отвальной насыпи скорость развития подподожвенных оползней должна быть минимальной без резких скачков сдвиговых деформаций. Отмечается, что при высоте ниж-

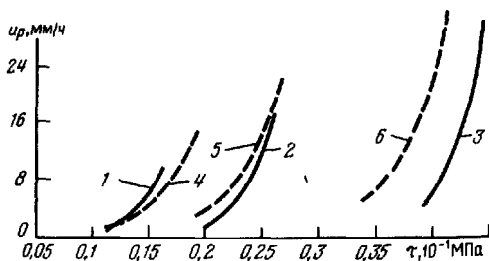


Рис. 63. Зависимости критических скоростей деформаций v_k от касательных напряжений τ для намывных грунтов пляжной (1, 2, 3 – соответственно при $\sigma_n = 0,05$; 0,1; 0,2 МПа) и ядерной (4, 5, 6 – соответственно при $\sigma_n = 0,05$; 0,1; 0,2 МПа) зон

него яруса автомобильного отвала 10–20 м (при массе автосамосвала до 120 т) скорости деформирования составляют около 0,2 м/ч, абсолютная деформация сдвига не превышает 2–3 м.

Упрощенная схема контроля устойчивости отвальных уступов по деформациям предусматривает размещение реперов на их площадках и сопоставление измеренных значений скоростей смещений с расчетными v_k . Значения v_k для намывных тонкодисперсных грунтов гидроотвалов Кузбасса определены Ю.В. Кириченко (рис. 63).

В последние годы в связи с быстрыми темпами развития открытых горных работ стала эффективно применяться наземная стереофотограмметрическая съемка горных выработок. Область распространения этого метода ограничена рядом факторов и не распространяется на намывные горнотехнические сооружения, отвалы и другие сооружения, где съемочные работы ведутся морально устаревшей техникой, а в ряде случаев (в ядерных зонах гидроотвалов) вообще не могут быть выполнены с достаточной полнотой и достоверностью.

Дальнейший прогресс в области совершенствования технологии съемочных работ на современном этапе должен осуществляться на основе аэрофотограмметрического метода. В СССР и за рубежом накоплен значительный опыт применения аэрофотосъемки в горном деле. Наибольший интерес представляет опыт ВАОГЕМА при производстве аэрофотосъемок бассейна КМА и аэрофотограмметрической службы карьеров объединения "Рейнбраун" (ФРГ) [47].

Область применения аэрофотосъемки может быть расширена за счет определения несущей способности намывных массивов. Известен способ дистанционного контроля состояния массива пород, включающий периодическое выполнение аэрофотосъемки территории, обработку снимков путем аналитической фототриангуляции, сопоставительный анализ моделей поверхности и определение относительной осадки массива (рис. 64).

Определение несущей способности намывных масс осуществляется следующим образом: По проектному контуру замыкаемой территории (емкости) устанавливают опознавательные знаки с известными координатами

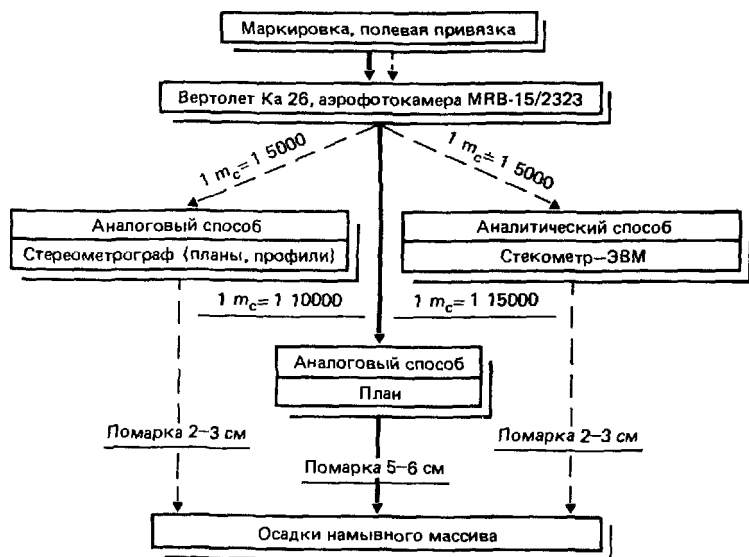


Рис. 64. Схема дистанционного контроля состояния намывного массива с использованием аэрофотосъемки (сплошной линией показан существующий способ, пунктирной – перспективный)

тами X , Y и Z . Выполняется аэрофотосъемка территории намывного массива на момент начала намывных работ, при этом масштаб залета выбирают, исходя из площади замываемой территории и заданной точности. Затем в результате обработки снимков путем аналитической фототриангуляции с использованием ЭВМ или аналогового способа [48] получается базовая модель территории, представляющая собой либо массив точек с координатами X , Y и Z , либо план с горизонтальными или высотными отметками точек поверхности. При этом для оценки несущей способности намывного массива аэрофотосъемку производят на моменты окончания намывных работ и начала следующего сезона работ по намыву, что позволяет зафиксировать изменение поверхности за период "отдыха" намывного массива.

Осадка намывного массива S и степень его уплотнения U для участков, отличающихся по мощности, гранулометрическому составу, прочностным свойствам намывного материала, определяются на основе сопоставительного анализа отметок поверхности на моменты съемок.

Эталонные зависимости между фактическими величинами предельно допустимой нагрузки и относительной осадкой контролируемого намывного массива $P_{\text{доп}} = f(S/h)$ устанавливают путем решения задачи "отдыха" слоя под собственным весом или "отдыха" под внешней нагрузкой [17]. После определения степени уплотнения и осадки слоя за период

между сезонами ведения намывных работ получают относительную осадку

$$S/h = a_0 0,5 \gamma' h U.$$

Через степень уплотнения определяют характеристики сопротивления сдвигу C и φ для конкретных условий. С использованием формулы Прандтля по зависимостям $P_{\text{пр}} = f(C, \varphi, a)$ и $P_{\text{доп}} = P_{\text{пр}}/\eta$ строят номограммы $P_{\text{доп}} = f(S/h_{\text{я}})$.

Величина $P_{\text{доп}}$, которая является критерием несущей способности на заданный момент времени, определяется по отношению S/h , устанавливаемому из результатов обработки двух последовательных аэрофотосъемок с использованием полученных номограмм.

Предложенный способ позволяет расширить область применения аэрофотосъемки за счет возможности оперативного определения несущей способности труднодоступных зон намывных массивов и обеспечивает проведение дистанционного контроля состояния гидроотвала, повышая тем самым безопасность ведения работ при одновременном снижении их стоимости и трудоемкости.

Предлагаемая методика дистанционного контроля уплотнения и соответственно несущей способности намывных массивов апробирована в условиях крупнейшего гидроотвала "Березовый Лог" бассейна КМА при съемках первой секции. Точность определения осадок характеризовалась средними квадратичными погрешностями порядка ± 5 см. Результаты аэрофотосъемки показали достаточно хорошую сходимость с данными наземной съемки и расчетами. В дальнейшем при производстве аэрофотосъемки намывных массивов Кузбасса и КМА для уточнения величины осадок и снижения средней квадратичной погрешности следует увеличить масштаб залета с одновременным созданием надежной сети наземных опорных точек.

Аэрофотосъемка намывных территорий обеспечивает наибольший эффект при сочетании ее с зондированием гидроотвалов комбинированными зондами МГИ и пенетрационно-каротажными станциями.

Комплексирование этих методов геомеханического контроля позволяет получать оперативную информацию для управления состоянием намывного массива с учетом дальнейшего народнохозяйственного использования территорий гидроотвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарвин Г.Т. Из практики эксплуатации хвостохранилищ. М., Атомиздат, 1980.
2. Нурок Г.А., Лутовинов А.Г., Шерстюков А.Д. Гидроотвалы на карьерах. М., Недра, 1977.
3. Мелентьев В.А., Колпашиников Н.П., Волнин Б.А. Намывные гидротехнические сооружения. М., Энергия, 1973.
4. Евдокимов П.Д., Сазонов Г.Т. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. М., Недра, 1978.
5. Федоров И.С., Захаров М.Н. Складирование отходов рудообогащения. М., Недра, 1985.
6. Гальперин А.М., Крячко О.Ю., Дергулев М.А. Геотехническое обслуживание гидроотвальных работ. М., изд. ЦНИИЭИУголь, 1971.
7. Крячко О.Ю. Управление отвалами открытых горных работ. М., Недра, 1980.
8. Дмитриенко Ю.Д., Левченко И.М. Гидроотвалы из глинистых грунтов. М., Стройиздат, 1975.
9. Таужнянская З.А. Стабилизация и рекультивация хвостохранилищ обогатительных фабрик за рубежом. М., Цветметинформация, 1976.
10. Дриженко А.Ю. Восстановление земель при горных разработках. М., Недра, 1985.
11. Тарало И.П. Некоторые результаты производственных исследований влияния магнитной обработки пульпы на интенсификацию процесса осаждения. — В кн.: Гидротехническое и промышленное строительство. Сб. научных статей КПИ, вып. 1, Калинин, 1975, с. 68—76.
12. Певзнер М.Е. Борьба с деформациями пород на карьерах. М., Недра, 1978.
13. Меламут Д.Л. Гидромеханизация в мелиоративном водохозяйственном строительстве. М., Стройиздат, 1981.
14. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М., Высшая школа, 1981.
15. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М., Стройиздат, 1983.
16. Зарецкий Ю.К., Вялов С.С. Вопросы структурной механики глинистых грунтов. — Основания, фундаменты, механика грунтов. 1971, № 3, с. 1—5.
17. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горнотехнических сооружений. М., Недра, 1977.
18. Прогноз скорости осадок оснований сооружений / Н.А. Цытович, Ю.К. Зарецкий, М.В. Малышев и др. М., Стройиздат, 1967.
19. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М., Энергоатомиздат, 1983.
20. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. М., Стройиздат, 1983.
21. Геомеханика отвальных работ на карьерах / П.Н. Панюков, В.В. Ржевский, В.В. Истомин, А.М. Гальперин, М., Недра, 1972.
22. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л., изд. ВНИИМ, 1972.
23. Гидрогеологические исследования в горном деле / В.А. Мироенко, Ю.А. Норватов, Л.И. Сердюков и др. М., Недра, 1976.
24. Терентьев В.И., Сафонов Л.В., Гончаров А.Г. Системный метод анализа эффективности промышленных взрывов. М., Наука, 1975.
25. Цытович Н.А. Механика грунтов. М., Высшая школа, 1983.
26. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М., Высшая школа, 1982.

27. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. М., Недра, 1973.
28. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. М., Недра, 1974.
29. Зарецкий Ю.К. Консолидация торфяного основания. — Основания, фундаменты, механика грунтов, 1970, № 6, с. 12–15.
30. Сухорев Б.В., Бочарова И.С. Вопросы взаимосвязи параметров консолидации и структуры слабых водонасыщенных грунтов. — Инженерная геология, 1986, № 2, с. 31–43.
31. Соколов В.Н., Лапочкин Б.К. Инженерно-геологические особенности намытых грунтов гидроотвалов Кузбасса. — Инженерная геология, 1979, № 5, с. 57–65.
32. Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров отвалов сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах. Л., изд. ВНИМИ, 1985.
33. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом. Л., Недра, 1986.
34. Эффективность гидравлического складирования полускальных пород на разрезах Кузбасса / Г.А. Нурок, С.М. Марченко, Н.Н. Медников, А.М. Гальперин. М., Изд. ЦНИЭИуголь, 1974.
35. Томаков П.И., Коваленко В.С. Рациональное землепользование при открытых горных работах. М., Недра, 1984.
36. Красавин А.П., Денисов Ю.И., Шауфлер А.Н. Динамика нарушений земной поверхности при открытой добыче угля в районах Урала и Кузбасса. — В кн.: Основы горнотехнической рекультивации породных отвалов. Челябинск, НИИОГР, 1970, с. 3–12.
37. Симкин Б.А., Бабеев А.М., Титовский В.И. Использование технологии рекультивации, выполняемой средствами гидромеханизации. Гидромеханизация и проблемы охраны окружающей среды. — Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. М., изд. МГИ, 1981.
38. Техника и технология рекультивации на открытых разработках. / А.К. Полищук, А.М. Михайлов, И.И. Заудальский и др. М., Недра, 1977.
39. Горлов В.Д. Рекультивация земель на карьерах. М., Недра, 1981.
40. Опыт строительства и рекультивации гидроотвала "Березовый Лог" / В.М. Павленко, В.М. Алыпов, Н.П. Кравченко, Ю.П. Горбатов. — Гидротехническое строительство, 1985, № 9, с. 32–35.
41. Гидравлическая укладка пород в отвалы с учетом их рекультивации / Г.А. Нурок, А.М. Гальперин, Ю.Н. Дьячков, И.С. Булгаков. — В кн.: Гидромеханизация в народном хозяйстве СССР. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование технологии и оборудования гидромеханизации горных, земляных, строительных и мелиоративных работ". М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1977, с. 107–109.
42. Горбатов Ю.П. Оценка возможностей применения способа гидромеханизации для пылеподавления на золоотвалах Экибастузской ГРЭС-1. — В кн.: Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных карьеров. Сб. научных трудов. М., изд. МГИ, 1982, с. 40–43.
43. Малюшицкий Ю.Н. Устойчивость насыпей-отвалов. Киев, Будивельник, 1975.
44. Повышение емкости и ускорения подготовка гидроотвалов / А.М. Гальперин, В.С. Зайцев, С.М. Марченко, Ю.П. Горбатов. М., изд. ЦНИЭИуголь, 1984.
45. Рекомендации по проектированию хвостовых хозяйств предприятий металлургической промышленности. М., Стройиздат, 1975.
46. Грязнов Т.А. Оценка показателей свойств грунтов полевыми методами. М., Недра, 1984.
47. Методические указания по применению аэрофотограмметрии для маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности, бортов карьеров и отвалов. Белгород, изд. ВЮГЕМ, 1983.
48. Лобанов А.Н. Аналитическая фототриангуляция с применением электронно-цифровой машины. М., Недра, 1975.
49. Penman A.D.M. Tailing dams — Ground Engineering, 1985, N 2, 18–22.
50. Laing I.M., Tweedie R.M., Acott C.P. Design construction and initial performance of the Obed Mountain tailing dam. Geotechnical Stability in Surface Mining. Proc. Int. Symp. Calgary, 1986, 269–275.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА I. Исходные положения к оценке состояния намывных массивов	8
I.1. Факторы, определяющие состояние массивов намывных горнотехнических сооружений.	8
I.2. Технология формирования сооружений и состояние намывных массивов.	19
I.3. Направления повышения эффективности и безопасности формирования намывных массивов	33
ГЛАВА II. Геомеханические процессы в намывных массивах и их основаниях	39
II.1. Краткий обзор теорий консолидации и ползучести грунтов	39
II.2. Инженерные методы расчета уплотнения тонкодисперсных масс . . .	44
II.3. Сдвиговая ползучесть тонкодисперсных грунтов.	60
ГЛАВА III. Оценка устойчивости намывных массивов	65
III.1. Методы расчета устойчивости откосных сооружений	65
III.2. Несущая способность и уплотнение намывных массивов	74
ГЛАВА IV. Экспериментальные исследования намывных тонкодисперсных грунтов	78
IV.1. Предварительные сведения	78
IV.2. Лабораторные исследования	84
IV.3. Натурные исследования	97
IV.4. Инженерно-геологическое районирование намывных территорий. . .	113
ГЛАВА V. Направленное воздействие на состояние намывных массивов	122
V.1. Влияние конструкции ограждающих дамб на состояние намывного массива	122
V.2. Опытные работы.	129
V.3. Формирование дренажных элементов во внутренних зонах намывных массивов	139
V.4. Экономико-математическое моделирование гидроствалообразования.	150
ГЛАВА VI. Подготовка намывных территорий для последующего народнохозяйственного использования	159
VI.1. Рекультивационные работы.	159
VI.2. Размещение сухих отвалов на намывных основаниях	173
VI.3. Установление темпов горнотехнической рекультивации на основе экономико-математического моделирования.	180
ГЛАВА VII. Геомеханический контроль намывных массивов.	184
VII.1. Совершенствование средств и методов контроля	184
VII.2. Схемы оперативного геомеханического контроля	191
Список литературы	197

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Гальперин Анатолий Монсеевич

**УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ
НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Заведующий редакцией *Т.И. Королева*

Редактор издательства *Э.Н. Чернегова*

Обложка художника *К.В. Голикова*

Художественный редактор *О.Н. Зайцева*

Технические редакторы *Л.Д. Агапонова, Н.С. Анашкина*

Корректор *М.Е. Лукина*

Оператор *И.В. Волкова*

ИБ № 6854

Подписано в печать 25.04.88. Т-11422. Формат 60х90 ¹/₁₆. Бумага офсетная № 2.
Набор выполнен на наборно-лithующей машине. Гарнитура "Прессо-роман". Печать
офсетная. Усл. печ. л. 12,50. Усл. кр.-отт. 12,75. Уч.-изд. л. 13,98. Тираж 990 экз.
Заказ 415 /1029- 9. Цена 2 р. 50 к.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
300600, г.Тула, проспект Ленина, 109.