

6
А-59
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КАЛИНИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кандидат технических наук старший научный сотрудник
Л. С. АМАРЯН

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научные консультанты:

доктор технических наук профессор

В. Г. БУЛЫЧЕВ

доктор технических наук профессор

В. М. НАУМОВИЧ

Калинин 1967

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КАЛИНИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кандидат технических наук старший научный сотрудник
Л. С. АМАРЯН

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научные консультанты:

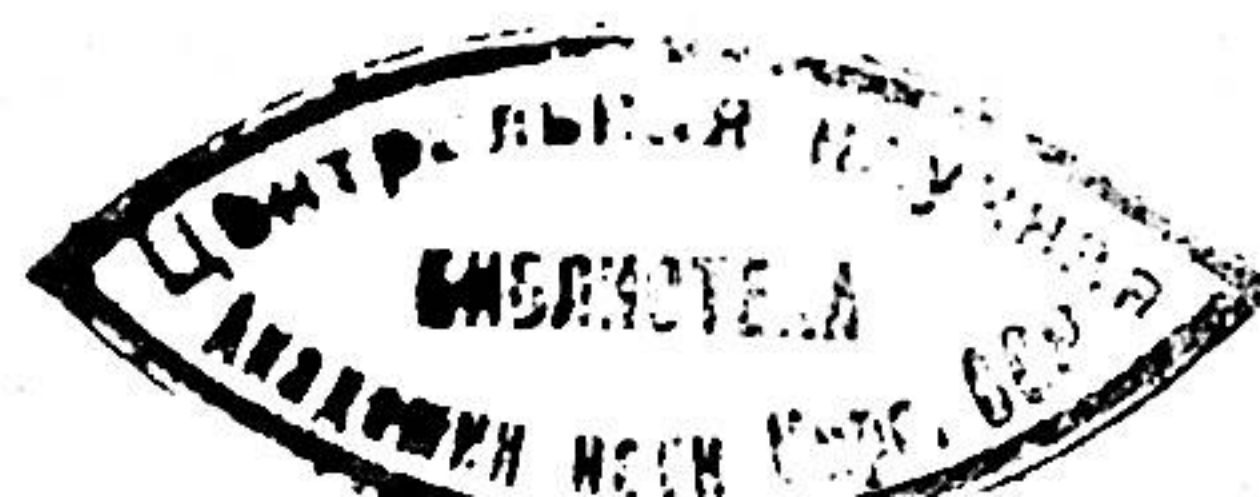
доктор технических наук профессор

В. Г. БУЛЫЧЕВ

доктор технических наук профессор

В. М. НАУМОВИЧ

Калинин 1967



Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации кандидата технических наук Л. С. Амаряна, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Работа выполнена на кафедре «Машины и процессы переработки торфа» Калининского политехнического института.

О дне защиты будет сообщено в газете «Калининская правда».

Оппоненты: доктор технических наук профессор Н. В. Чураев, Москва, Институт физической химии АН СССР; доктор географических наук профессор К. Е. Иванов, Ленинград, Государственный гидрологический институт; доктор технических наук профессор Б. А. Ржаницын, Москва, институт оснований и подземных сооружений.

Оппонирующая организация — Белорусский научно-исследовательский институт мелиорации и водного хозяйства.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Калининского политехнического института за 10 дней до защиты.

Отзывы в двух экземплярах с заверенными подписями просим направлять по адресу: г. Калинин, 5, Первомайская набережная, 22, политехнический институт, ученому секретарю.

Защита диссертации предполагается 24 мая 1967 г.

Дата отправки автореферата _____ 1967 г.

Ученый секретарь совета кандидат технических наук

Е. КОНОВАЛОВ.

Торфяные месторождения широко распространены на территории нашей страны и интенсивно используются во многих отраслях промышленности.

Директивами XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. предусмотрено увеличить добычу торфа до 92 млн. т, что потребует освоения более 80 тыс. га новых торфяных месторождений. Громадные объемы мелиоративных работ связаны с планами освоения 6,5 млн. га заболоченных и избыточно увлажненных земель. Значительно возрастут масштабы использования торфяных месторождений в связи со строительством в новой пятилетке более 80 тыс. км дорог и трубопроводов.

Общезвестные трудности, встречающиеся при освоении торфяных месторождений или заболоченных территорий, обусловлены избыточным их увлажнением, малой плотностью и низкой прочностью.

Основные задачи практики сводятся, с одной стороны, к оценке прочностных и деформационных свойств торфяной залежи под действием кратковременных нагрузок (машины и оборудование) и длительно действующих давлений (насыпи и сооружения), а с другой — к разработке и осуществлению мероприятий, удовлетворяющих растущие требования практики.

Указанные задачи требуют углубленного изучения структурно-механических свойств торфа ненарушенной структуры в условиях управляемого объемно-напряженного состояния и длительно развивающихся процессов. Основное внимание при этом должно быть уделено физико-химической природе торфа, предопределяющей изменчивость параметров системы и возможность получения новых физических закономерностей и гипотез для создания более точных расчетов.

В диссертационной работе структурно-механические свойства торфа рассматриваются с позиции физико-химической

механики дисперсных систем с учетом поверхностных явлений и физико-химии высокомолекулярных соединений (П. А. Ребиндер, В. А. Каргин, Б. В. Дерягин, С. Н. Журков, М. П. Воларович, С. В. Нерпин, Н. В. Чураев и др.), а также механики грунтов (Н. М. Герсевич, В. А. Флорин, Г. И. Покровский, В. Г. Булычев, В. Г. Березанцев и др.).

Применительно к торфу эти направления широко использованы в исследованиях С. Г. Солопова, В. Г. Горячкина, Ф. П. Винокурова, А. В. Пичугина, В. М. Наумовича, Ю. П. Видмантаса, И. Д. Беловидова, С. С. Корчунова, К. П. Лундина, Н. И. Малинина и др.

Для объяснения механизма сложных явлений, протекающих под влиянием химических и ионообменных процессов, решающее значение приобретают исследования В. Е. Раковского с сотрудниками, С. С. Драгунова, А. А. Березина, П. И. Белькевича, И. М. Курбатова, М. Н. Никонова, Т. А. Кухаренко и др.

В диссертационной работе поставлена задача комплексно оценить структурно-механические свойства торфяной залежи в природном залегании и установить с учетом физико-химической природы торфа закономерности изменения основных его параметров в условиях объемно-напряженного состояния и во времени с целью их использования в расчетах несущей способности и деформируемости торфяного основания, устойчивости откосов осушителей, оптимальных условий нагружения и разработки мероприятий по укреплению залежи различными методами.

Эти вопросы до настоящего времени оставались недостаточно изученными, что тормозило получение необходимых рекомендаций для теоретических обобщений и практических расчетов. Отсутствие необходимой аппаратуры и недостаточно широкое использование современных, особенно полевых методов исследования структурно-механических свойств торфяной залежи не позволяют оценить наиболее вероятные их значения, а также истинный характер распределения и вариацию основных признаков торфа в природных условиях.

Поэтому второй задачей диссертации является разработка комплекса современных методов и приборов для определения структурно-механических свойств торфа, преимущественно в условиях естественного залегания торфяной залежи.

Диссертационная работа выполнена в Калининском политехническом (б. торфяном) институте в течение 1961—1966 гг. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных

и полевых условиях на различных торфяных месторождениях Северо-Западной, Средней и Уральской торфяно-болотных областей СССР.

1. СТРУКТУРА И ПРИРОДА ПРОЧНОСТИ ТОРФА

Структурно-механические особенности торфяной залежи обусловлены свойствами чередующихся напластований торфа, характером распределения пор и дефектов структуры, а также соотношением различных фаз, формирующих строение системы в целом.

Природная прочность торфяной залежи в основном зависит от содержания и степени сохранности волокнистого каркаса, обладающего высокомолекулярным строением. Тонкодисперсные фракции торфа при этом играют роль пассивного наполнителя и оказывают заметное влияние лишь на процессы уплотнения, протекающие за счет фильтрации влаги.

Структурное сцепление природного торфа обусловлено тремя основными факторами: прочностью волокнистой массы, сопротивлением скольжению волокон и агрегатов и сцеплением структурных элементов на поверхностях контактов.

Механические свойства волокон торфообразователей определяются содержанием в них целлюлозы (В. Е. Раковский, А. В. Пичугин, И. Ф. Ларгин, М. Н. Жуков) и армированием аморфных веществ клеточных стенок целлюлозными микрофибриллами (Фрей-Вислинг).

Результаты испытания влагонасыщенных волокон торфообразователей, представленные в таблице 1, показали, что средние значения предела прочности на растяжение возрастают от 300 до 900 кг/см² при повышении содержания целлюлозы от 17 до 26%. В опытах не обнаружено влияние временного фактора на прочность волокон вследствие существенной изменчивости предела прочности на разрыв (таблица 2), оцениваемой коэффициентом вариации около 60%.

В процессе торфообразования исходная структура волокон подвергается интенсивному разрушению, вследствие чего значительно изменяются структурно-механические свойства самого торфа.

В процессе распада и химических превращений исходных веществ торфа протекают два противоположных явления: снижение прочности волокнистого каркаса вследствие разрушения клеточных стенок волокон и уменьшение водоудерживающей способности, сопровождающееся ростом плотности за-

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЧНОСТИ ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Торфообразователи	Разрывное усилие, Г	Предел прочности на разрыв $\sigma_p, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	Содержание, %	
			целлюлозы	легкогидро- лизуемых
Сфагновые мхи	100—250	300	17	57
Пушица	300—350	550	25	35
Осока	500—600	850	26	30

Таблица 2

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ВОЛОКОН
ОСОКИ НА РАЗРЫВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ**

Продолжительность испытания и проч- ность	Скорость деформации, мм/час				
	60	240	800	2400	9600
t, сек.	200—600	40—140	20—40	8—15	2—4
σ_p , кг/см ²	250—1500	260—1600	180—1100	240—1500	200—1400

лежи. Интенсивность протекания этих процессов, вызывающих разупрочнение и восстановление прочности системы, зависит от структуры и компонентного состава торфа, ионообменных процессов и влияния внешних факторов (С. С. Драгунов, Л. И. Белькевич, А. А. Березин, Н. В. Чураев).

Повышенная кислотность верхового торфа препятствует реакции обмена и агрегации частиц, вследствие чего тонкодисперсные фракции образуют структурированную пространственную сетку, обладающую высокой водоудерживающей способностью.

Высокая природная плотность и прочность низинного торфа объясняется протеканием свободной реакции обмена, сопровождающейся агрегацией частиц, отжатием неподвижной влаги из них или образованием гуматов различных металлов. При высокой степени разложения, как это следует из данных таблиц 3 и 7, различие структурно-механических свойств верховых и низинных видов торфа объясняется, главным образом, указанными выше явлениями. Однако с преобладанием в системе волокнистой массы свойства торфа будут в

значительной мере обусловлены структурой и составом частиц грубодисперсной фракции.

В таблице 3 в обобщенном виде представлены основные физико-химические и механические параметры торфяной залежи. Эти данные показывают, что параметры дисперсности, катионного состава, кислотности и группового состава в отдельности, без учета влажности, не определяют механические свойства торфяной залежи. В то же время влажность тесно связана с содержанием волокнистой массы, которая в свою очередь характеризует изменчивость группового состава торфа и степень его разложения.

Выбор тех или иных параметров в качестве критериев для оценки механических свойств торфа в значительной мере обусловлен методикой и сложностью их определения. Из взаимообусловленных параметров дисперсности, группового состава и степени распада торфа в настоящее время сравнительно просто определяется степень разложения, которую можно принять в качестве обобщенного критерия. В качестве характеристики структуры торфа более удобно использовать в практических целях значение кислотности или pH торфа. Состояние системы по плотности определяется содержанием влаги и воздуха.

Исходя из указанных замечаний, можно при оценке структурно-механических свойств торфяной залежи пользоваться тремя основными параметрами: влажностью, степенью разложения и кислотностью с учетом газосодержания и зольности торфа. Эта рекомендация более подробно обоснована в последующих разделах настоящей работы.

В настоящее время вопрос о газосодержании торфяной залежи изучен недостаточно полно. Более подробно рассмотрено газосодержание деятельного слоя залежи (К. Е. Иванов, П. Д. Варлыгин, К. П. Лундин, В. В. Романов). Многие авторы допускают, что газосодержание торфяной залежи ниже уровня грунтовых вод, невелико (1—3%), и им можно пренебречь.

Наши исследования показали, что газосодержание торфяной залежи существенно зависит от структуры волокнистой массы и степени ее распада. При длительном влагонасыщении верхового и низинного торфа различной степени разложения свободный воздух межчастичного пространства удаляется почти полностью. В то же время содержание воздуха внутри-сосудистых или замкнутых пор остается неизменным. Характерно, что процесс уплотнения торфа под давлением до

ОСРЕДНЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗИННЫХ И ВЕРХОВЫХ
ГРУПП ТОРФА

Тип, подтип, группа и вид торфа	Влаж- ность W, %	Сте- пень разло- жения R, %	Коэф- фици- ент по- сто- сти ϵ	Проч- ность $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	Содержание катионов $\text{Ca} + \text{Mg} +$ $+ \text{Fe},$ $\frac{\text{мг экв}}{100 \text{ г}}$	Кис- лот- ность, pH	Содержа- ние фрак- ций, > 250 мк	Групповой состав, %			Ас %
								легко- гидро- лизую- мые	гуми- новые кисло- ты	целлю- лоза	
А. Низинный											
1. Лесной, древесная	540	45	7,5	0,18	106,5	4,8	35,8	18,0	43,0	1,48	9,0
2. Лесотопяной, древесно-травяная	640	40	9,7	0,15	85,2	4,7	40,6	20,4	40,1	1,2	7,2
3. Топяной, травяная	800	30	12,0	0,15	110,1	5,0	39,8	31,7	33,2	3,7	7,3
4. Топяной, травяно-моховая	860	20	13,0	0,15	90,6	4,8	54,5	29,6	30,0	3,0	6,8
Б. Верховой											
5. Топяной, моховая											
а) комплексно-верховой	900	15	14,4	0,16	25,1	3,3	69,0	41,9	18,8	5,2	2,9
б) фускум	1060	10	17,0	0,13	19,2	3,0	72,0	43,3	9,4	12,7	1,8
в) меду	1400	15	21,0	0,09	24,1	3,6	53,3	41,1	18,7	10,5	2,1
6. Топяной, травяная	1200	20	19,0	0,15	15,6	3,4	48,0	26,0	28,7	6,2	2,1

0.5 кг/см² не затрагивает этот объем воздуха и тем самым подтверждает предположение о малом объемном деформировании сосудистых полостей волокон.

В целом содержание заземленного воздуха во влагонасыщенном торфе обратно пропорционально его степени разложения и колеблется в пределах от 2 до 8%. Наибольшее содержание воздуха наблюдается в волокнах мхов, в которых имеется значительное количество внутренних полостей.

Наличие в торфе влаги и воздуха, взаимодействующих с активными участками поверхности частиц, снижает вероятность непосредственного их контактирования или появления первичных валентных связей (В. М. Наумович). Влияние влаги на структурно-механические свойства торфа проявляется во многих явлениях. Действие ионов или активных центров подкладки на трансляционное движение молекул воды затрудняет их обмен вблизи источника сил (О. Я. Самойлов, А. А. Ананян), вследствие чего сорбированная влага приобретает большую вязкость, характеризующую предельным напряжением сдвига (Б. В. Дерягин, С. В. Нерпин). Гидратация частиц, сопровождаемая разрывом молекулярных и водородных связей, облегчает конфигурационные изменения макромолекул, снижает энергию деформационных переходов и повышает гибкость волокон и агрегатов. Эти явления в целом способствуют более плотной упаковке частиц при уплотнении.

С другой стороны, влага значительно повышает сопротивление деформированию влагонасыщенных частиц, обладающих высокоразвитой внутренней поверхностью, и препятствует сцеплению частиц или образованию прочных связей вследствие гидратации активных центров и увеличения расстояния между взаимодействующими структурными элементами.

В процессе распада волокон, высвобождающего макромолекулы химических компонентов от внутренних связей, набухание частиц не ограничено, вследствие чего в водонасыщенной системе решающую роль играют лишь дальнедействующие молекулярные силы (в основном ориентационной природы).

При наличии поверхности раздела фаз в тонких порах сцепление в торфе дополнительно обусловлено капиллярными явлениями, которые проявляются более заметно в деятельном слое торфяной залежи.

Наличие валентных, водородных и молекулярных связей в основных цепях и боковых группах макромолекул волокон

является основной причиной высокой их прочности, благодаря которой торфяная залежь не теряет свою устойчивость в условиях полного влагонасыщения. При полном разрушении волокнистого каркаса влагонасыщенного торфа структурное сцепление практически отсутствует и система переходит в текучее состояние.

Основное отличие механических свойств торфа от минеральных грунтов обусловлено, главным образом, наличием волокнистого каркаса, придающего системе заметную связность даже в условиях избыточного увлажнения.

Полидисперсность и многокомпонентность торфа наряду с неоднородной его структурой затрудняют возможность оценки сил взаимодействия между частицами в явном виде. Поэтому механические свойства влагонасыщенного торфа, в частности его прочность, можно рассмотреть по степени сохранности волокнистого каркаса, обусловленной содержанием целлюлозы, соотношением грубо- и тонкодисперсных фракций и содержанием твердой фазы в единице объема. Последнее определяет интенсивность взаимодействия частиц твердой фазы по числу связей или контактов при известном значении активности и поверхностной дисперсии контактируемых элементов.

При известном коэффициенте пористости торфа процесс разрушения всей системы можно рассмотреть, исходя из напряженного состояния скелета или значения эффективного напряжения при растяжении. Напряжение σ_e , действующее в скелете, можно найти по величине номинального напряжения σ и коэффициента пористости ε : $\sigma_e = \sigma (1 + \varepsilon)$.

Напряжения, действующие на волокнистый каркас при заданной степени распада и условии полного вовлечения всех волокон в акт разрыва σ_R , σ_t , определяются также по указанному уравнению, но с учетом заданных свойств торфа. Исходя из условия предельного состояния равновесия системы, когда эффективные напряжения σ_R достигают значения предела прочности $\sigma_{пр}$: $\sigma_R - \sigma_{пр} = 0$, можно найти величину предельного напряжения при разрыве образца по уравнению:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{по}}{1 + \varepsilon_R}$$

Общую прочность волокнистой массы $\sigma_{пр}$ при данной степени распада, определяемой содержанием целлюлозы, можно оценить по значению начальной прочности σ_p , которая

определяется испытанием неразложившихся волокон на разрыв. Отношение содержания целлюлозы в разложившемся m_R и неразложившемся m_0 торфе с учетом степени разложения R_0 в долях единицы, характеризующей общее содержание волокнистой массы в торфе, определяет снижение величины σ_p , что позволяет выразить величину $\sigma_{пр}$ по уравнению

$$\sigma_{пр} = \sigma_p \frac{m_R}{m_0} (1 - R_0).$$

Соответственно изменение коэффициента пористости разложившейся массы ε_R можно оценить по начальным его значениям

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{1 - R_0}.$$

Тогда общее уравнение теоретической прочности волокнистой массы торфа примет следующий вид:

$$\sigma_t = \sigma_p \frac{m_R (1 - R_0)^2}{m_0 (1 - R_0 + \varepsilon)}.$$

Для полностью влагонасыщенного торфа можно коэффициент пористости выразить через влажность, то есть $\varepsilon = W\rho$, принимая плотность влаги, равную единице.

Содержание целлюлозы в торфе m_R (В. Е. Раковский) приближенно определяется по уравнению:

$$m_R = m_0 - n_1 R_1 - n_2 (R - R_1),$$

где $R_1 \leq 10\%$; $n_1 = 0,8$ и $n_2 = 0,12$ — верховой торф;

$n_1 = 2$ и $n_2 = 0,07$ — низинный торф.

Практически наблюдаемая прочность $\sigma_{зал}$ торфяной залежи значительно ниже, чем теоретическая σ_t , ибо процесс разрушения сопровождается разрывом лишь незначительного количества волокон. Расчеты показали, что в широком диапазоне изменения влажности отношение $n = \frac{\sigma_{зал}}{\sigma_t} \approx 0,04 - 0,05$ и остается постоянным. Показатель снижения прочности торфа n указывает, что в природных условиях теоретически возможная прочность волокнистого каркаса торфа реализуется всего лишь на 4—5%.

С учетом показателя n и влияния предельного напряжения сдвига $\Theta_2 (W)$ тонкодисперсных фракций можно найти величину природной прочности торфа по уравнению:

$$\sigma_{зал} = \sigma_p \frac{m_R (1 - R_0)^2 n}{m_0 (1 - R_0 + \varepsilon)} + \Theta (W).$$

Анализ теоретической прочности торфа указывает на наличие в торфе больших резервов по прочности, не используемых на практике. Повышая трение и сцепление между структурными элементами торфа при помощи различных химических добавок (Б. А. Ржаницин, В. М. Безрук, С. С. Морозов, Б. М. Гуменский, Г. Н. Жинкин и др.), можно существенно повысить несущую способность торфяной залежи, не прибегая при этом к дополнительному ее уплотнению нагружением.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТОРФА

Закономерности деформирования торфа как органической горной породы многими исследователями рассматриваются с позиции механики минеральных грунтов без достаточного учета специфических особенностей структуры и состава частиц и всей системы. Основное отличие торфа от минеральных грунтов вытекает из строения и состава частиц. Частицы торфа имеют высокомолекулярную природу, обладают клеточным строением с развитой внутренней поверхностью и упруго-вязко-пластичными свойствами. Наличие в частицах большого количества внутренних пор и малая плотность упаковки структурных элементов в системе являются причиной накопления значительного количества осмотической и механически иммобилизованной влаги. Поэтому природная влажность торфа в среднем на один-два порядка выше, чем у влагонасыщенных минеральных грунтов, а деформации торфа сопряжены с дополнительной сжимаемостью структурных элементов.

Исследования, проведенные на образцах, монолитах и непосредственно в залежи, показывают, что при уплотнении влагонасыщенного торфа наблюдается несколько последовательно протекающих стадий. Начальная максимальная интенсивность отжатия влаги из порового пространства торфа обусловлена наличием в нем крупных водопроводящих пор. Эта стадия, названная стадией интенсивной влагоотдачи торфа, характеризуется изменением величины коэффициента пористости ϵ_1 по отношению к начальному ϵ_n в пределах

$$\epsilon_1 = (0,77 \div 0,83) \epsilon_n.$$

Внешнее давление, вызывающее эту стадию отжатия влаги, не превышает $0,10\text{--}0,15 \text{ кг/см}^2$. Последующее уплотнение выравнивает структуру и размеры пор торфа, что способствует фильтрации влаги через более мелкие поры. Опыты,

проведенные на специальных компрессионно-фильтрационных приборах, показали, что вторая стадия отжатия влаги до внешнего давления $0,40 \text{ кг/см}^2$ все еще не сопровождается аномальными явлениями.

В третьей стадии интенсивность отжатия влаги при уплотнении существенно снижается и при давлении около $2\text{--}3 \text{ кг/см}^2$ почти прекращается. Этому давлению соответствует первая критическая точка влагосодержания $W_{кр} = 250\text{--}300\%$ (Н. К. Работнов, Е. П. Семенский, А. К. Галыбин, М. Г. Булышко).

Все указанные стадии протекают за счет отжатия влаги из пор межчастичного пространства и внутрисосудистых пор. Расчет показывает, что при средних размерах сечения внутриклеточных пор около 10 мк , содержание в них влаги составляет около 160% . Подобная влажность в торфе достигается при четвертой стадии или давлениях свыше $25\text{--}30 \text{ кг/см}^2$. Расчет и эксперименты показывают, что до четвертой стадии уплотнения внешняя нагрузка не затрагивает влагу внутриклеточных пор вследствие высокого сопротивления деформированию клеточных стенок. В значительной мере отсутствие переноса внутриклеточной влаги обусловлено сужением пор до размеров, при которых фильтрация вязкой влаги протекает под действием молекулярных сил подкладки и коагуляции водопроводящих путей тонкодисперсными фракциями.

В результате изучения характеристик структуры уплотняемого торфа методами отрицательной адсорбции сахара (А. В. Думанский) и радиоактивных изотопов (М. П. Воларович, Н. В. Чураев) было установлено, что изменения средне-взвешенного значения гидравлического радиуса пор протекают в соответствии с указанными выше стадиями уплотнения. Характерные при этом изломы кривых $\gamma\text{--}\sigma$ близки к значениям σ , составляющим в среднем $0,15$; $0,40$ и 2 кг/см^2 . При степени разложения торфа более 10% значения $\gamma_{\max}$ и $\gamma_{\min}$ при $\sigma \geq 0,40 \text{ кг/см}^2$ колеблются в пределах от $0,05$ до $0,5 \text{ мк}$, указывая на появление в тонких слоях влаги предельного напряжения сдвига, изменяющего характер начальной линейной закономерности фильтрационного процесса.

Существенное влияние на этот процесс оказывают степень распада волокнистой массы и соотношение между грубо- и тонкодисперсными фракциями. С целью изучения влияния этих фракций на процесс фильтрации влаги через уплотняемый торф нами проводились опыты на образцах, состоящих

из отмытых от общей массы грубо- и тонкодисперсных фракций.

Сравнение водопроницаемости волокнистой массы почти неразложившегося торфа и отмытых из торфа ($R=35\%$) волокон показывает, что разрушение клеточного и сосудистого их строения естественным (микробиологический распад) или искусственным (диспергирование) путем существенно снижает водопроницаемость образцов при одинаковом коэффициенте пористости. При этом чем выше в измельченных волокнах содержание гемицеллюлозы (у сфагновых мхов по сравнению с осокой), тем меньше водопроницаемость. При уплотнении подобных образцов давлением свыше $0,40 \text{ кг/см}^2$ происходит выравнивание пор по размерам и разница по водопроницаемости у сравнимых образцов сглаживается.

Причина указанных явлений обусловлена ростом поверхностной шероховатости и активности частиц вследствие разрушения сосудистого и клеточного строения волокон. Последнее способствует высвобождению макромолекул гемицеллюлозы от внутренних связей в клеточной стенке и образованию пространственной структурированной сетки набухших ассоциатов, сужающих водопроводящие каналы и снижающих в целом водопроницаемость системы. Существенное различие по водопроницаемости наблюдается также у мелкораздробленных фракций, отмытых из низинного осокового торфа при $R=35\%$ и верхового сфагнового торфа — $R=25\%$. При одинаковой плотности образцов водопроницаемость указанных фракций у осокового торфа выше, чем у сфагнового, что можно объяснить агрегированностью частиц и повышенным содержанием коагулирующих многовалентных катионов в низинном торфе. Частицы торфа обладают также различной плотностью, химическим составом и содержанием минеральных компонентов. Наиболее плотно упакованы макромолекулы органических веществ в клеточной стенке волокон, вследствие чего их удельный вес достигает $1,65 \text{ г/см}^3$. В процессе разложения волокон или разрушения физико-химических связей между макромолекулами аморфных веществ удельный вес твердой фазы снижается до $1,50 \text{ г/см}^3$. Однако с повышением в частицах и твердой фазе минеральных компонентов вновь наблюдается повышение ее удельного веса.

Исследование сжимаемости сухого торфа в интервале уплотняющего давления от 0 до 10000 кг/см^2 показало, что предельная плотность системы достигается при давлении около 5000 кг/см^2 , после чего она изменяется лишь на 2—3%.

Эти исследования позволили предложить новый метод определения удельного веса твердой фазы торфа и конструкцию прибора, в котором применен способ уплотнения при высоких давлениях. Сопоставление результатов определения удельного веса методами высоких давлений и пикнометрирования указывает на хорошую их сходимость (ошибка менее $\pm 3\%$). Применение нового метода в десятки раз снижает трудоемкость и продолжительность опыта, что позволяет производить массовые определения удельного веса и повысить точность определения плотности системы.

Результаты многочисленных испытаний показали, что колебание удельного веса твердой фазы нормально зольных торфов составляет у верхового торфа $1,43\text{—}1,65 \text{ г/см}^3$, а низинного $1,56\text{—}1,78 \text{ г/см}^3$.

Процесс уплотнения торфа в значительной мере характеризуется деформационными свойствами частиц твердой фазы, условиями их контактирования и развитием контактных площадей.

Для изучения процессов контактирования частиц торфа был создан оптико-фотометрический прибор, подобный прибору Н. Б. Демкина, в котором использовался оптический метод Мехау, основанный на нарушении полного внутреннего отражения в местах контакта стеклянной призмы с выступами твердого тела. Опыты показали, что формирование контактных поверхностей протекает в зависимости от механических свойств самих частиц. При уплотнении дисперсных систем, состоящих из упругих частиц (глина, асбест), около 97% фактической площади контактов формируется почти мгновенно. Однако у органических систем (торф, сено, солома, древесные волокна) в стадии условномгновенного деформирования формируется не более 80—85% фактической площади контактов, что объясняется вязко-пластичными свойствами частиц и более заметной ползучестью скелета. В исследованиях процессов контактирования частиц дисперсных систем также обнаружено, что стабилизация процесса контактирования частиц во времени наступает за более длительный период (десятки часов), чем деформирования образца при уплотнении (несколько часов при толщине образца около 2 мм).

Обнаруженное явление позволяет объяснить причину повышения прочности дисперсных систем во времени без заметного изменения их объема и влажности под действием по-

стоянного давления (Н. Н. Маслов, С. Н. Егоров, И. М. Горькова).

Исследования показали, что механическое диспергирование волокон торфа вызывает снижение фактической площади контактов F . Подобное явление обнаруживается и при сравнении F у разложившихся, но отмытых из торфа волокон и неразложившихся торфообразователей, что указывает на общность явлений микробиологического распада и механического диспергирования, вызывающих повышение шероховатости поверхности частиц. В торфе с ростом степени разложения до 25—30% значения фактической площади контактов снижаются вследствие повышения поверхностной шероховатости волокнистой массы при распаде. При $R > 30\%$ наблюдается обратное явление, что можно объяснить переходом значительной части волокнистой массы в мелкораздробленные и тонкодисперсные фракции, которые при сушке образуют плотные агрегаты и повышенную поверхность контактов. Наибольшее влияние на процессы формирования контактных поверхностей оказывает влажность, которая снижает сопротивление деформированию волокон и агрегатов вследствие гидратации активных центров структурных элементов и разрыва определенной части вторичных связей.

Опыт показывает, что в природных условиях нагружения торфа ($< 2 \text{ кг/см}^2$) фактическая площадь контактов не превышает 1—2% номинальной, поэтому можно полагать, что сцепление в залежи в основном обусловлено переплетением волокон и сопротивлением скольжению частиц при деформировании.

На основании полученных результатов можно утверждать, что известные закономерности механики грунтов могут быть применимы к торфу с определенными допущениями, учитывающими особенности строения частиц торфа, обладающих развитой внутренней поверхностью, вязко-пластичными свойствами и существенной изменчивостью состава и структуры в процессе торфообразования.

Разработанные методы исследования водопроницаемости и формирования контактных поверхностей у отдельных компонентов твердой фазы и в целом торфа позволили установить влияние структуры частиц на процесс деформирования влагонасыщенного и сухого торфа и выявить причины возникновения характерных стадий уплотнения.

Предложенный метод высоких давлений позволяет производить массовые определения удельного веса твердой фазы

торфа и значительно повысить точность расчета коэффициента пористости.

III. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ТОРФА ПРИ ТРЕХОСНЫХ И ОДНООСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Комплексное изучение характеристик управляемого объемно-напряженного состояния грунта успешно решается при трехосных испытаниях с помощью стабилометров (Н. Н. Давиденков, В. Г. Булычев, Е. И. Медков, Н. В. Лалетин, Н. Н. Сидоров, В. П. Сипидин, М. Н. Гольдштейн, А. Бишоп и др.).

В области исследования свойств торфа в условиях трехосного сжатия выполнено всего лишь несколько работ (Е. Ханрахан, Л. Гудман, И. Адамс, Д. Шредер, А. Макфарлейн), в которых на ограниченном количестве образцов рассмотрены процессы деформирования и предельного состояния равновесия с учетом перераспределения напряжений внутри системы.

В указанных работах отсутствуют количественные обобщения, достаточные для получения практических рекомендаций, а также не раскрыт механизм изменения напряженного состояния торфа в зависимости от особенностей структуры и состава.

С целью более широкого рассмотрения объемно-напряженного состояния торфа были разработаны конструкции специальных стабилометров, в которых учтены такие специфические особенности испытания, какими являются высокая сжимаемость и малая устойчивость образцов, наличие заземленного воздуха и др. Вследствие наличия в торфе неразложившихся волокон и древесных включений особое внимание обращено на отбор образцов торфа ненарушенной структуры. Для успешного решения этой задачи были разработаны конструкции специальных пробоотборников, оснащенных активными режущими органами.

В диссертации изложены результаты трехосного испытания более 50 образцов торфа, полученные при дренированных и недренированных условиях уплотнения со стабилизацией порового давления и деформаций.

Осевое давление σ_1 прикладывалось к образцу ступенями через 0.10 кг/см^2 до полного разрушения при постоянном всестороннем давлении $\sigma_3 = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$ и 0.5 кг/см^2 .

Опыты показали, что в отличие от минеральных грунтов образцы торфа подвержены деформированию при малых начальных нагрузках, не превышающих структурное сцепление. Поэтому вопрос о структурном сцеплении для торфа, содержащего волокнистую массу, следует рассматривать лишь с позиции разрушения, а не уплотнения, ибо сжимаемость торфа примерно на один порядок выше, чем у минеральных грунтов.

Результаты трехосного испытания водонасыщенных образцов торфа показывают, что в процессе нагружения внешнее давление при $\sigma > 0,1$ кГ/см² всецело воспринимается поровой влагой. Для недренированных условий соблюдается закон Терцаги-Герсеванова $\sigma' = \sigma - U_w$. В процессе дренированного испытания поровое давление U_w в течение 30—40 сек достигает максимума ($\sim \sigma$), а затем снижается с различной интенсивностью в зависимости от плотности, степени разложения или от водопроницаемости образца.

Характерно, что после дренированного уплотнения образца всесторонним давлением σ_3 и при последующем осевом нагружении по закрытой системе наблюдается практически прямолинейная зависимость U_w от σ_1 вплоть до стадии разрушения. Интенсивность этого процесса снижается с ростом плотности образца. Для торфов степени разложения $R < 25-30\%$ отношение $\frac{U_w}{\sigma_1} \approx 1$. При $R > 30-35\%$ это отношение приближается к 0,5—0,6.

Закономерности изменения порового давления при дренированных испытаниях носят сложный характер и тесно связаны с изменениями структуры торфа в процессе уплотнения.

Кинетика изменения U_w по мере ступенчатого роста σ_1 характеризуется максимальными (условно мгновенными) и минимальными (стабилизированными) значениями порового давления в зависимости от всестороннего давления σ_3 или установившейся плотности образца торфа. При значениях $\sigma_3 < 0,40$ кГ/см² остаточное поровое давление в дренированном образце мало (0,01—0,05 кГ/см²), и им можно пренебречь. В тех случаях, когда $\sigma_3 > 0,40$ кГ/см², поровое давление в образце не рассасывается полностью в течение одного и более месяцев вследствие появления начального градиента напора воды. Длительные дренированные испытания позволили установить, что

при $\sigma_3 < 0,40$ кГ/см², $U_0 \rightarrow 0$, $\sigma'_{ст} \rightarrow \sigma$,

при $\sigma_3 > 0,40$ кГ/см² $U_0 \rightarrow \frac{U_{мг}}{2}$, $\sigma'_{ст} = \sigma (1 + \operatorname{tg} \alpha) - \frac{U_{мг}}{2}$,

где α — угол наклона прямой $U_w - \sigma$ к оси σ ; U_0 — остаточное поровое давление; $U_{мг}$ — условно мгновенное значение порового давления и $\sigma'_{ст}$ — стабилизированное значение эффективного напряжения.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами экспериментальных исследований водопроницаемости торфа при различной плотности. Давление $\sigma \approx 0,40$ кГ/см² является, очевидно, порогом, при котором наблюдается замедление скорости фильтрации за счет влияния поверхностных сил и появления следов сдвиговой прочности в тонких (менее 0,4 мк) слоях влаги. Начиная от $\sigma_3 \approx 0,40$ кГ/см², дальнейшее нагружение дренированного образца вызывает пропорциональный рост порового давления вплоть до разрушения. Интенсивность этого процесса снижается с ростом плотности и степени разложения торфа.

Деформирование образцов торфа при трехосных испытаниях сопровождается некоторыми явлениями, специфичными для торфа. Независимо от условий дренирования, скорости нагружения и при всестороннем давлении $\sigma < 0,4$ кГ/см² между относительной деформацией образца λ и осевым давлением σ_1 наблюдается прямопропорциональная связь в широких пределах изменения последнего. Это явление объясняется высокой сжимаемостью и низкой структурной прочностью торфа, не оказывающей существенного влияния на процесс поперечного расширения образца. При недренированных испытаниях влагонасыщенного торфа предельные деформации возникают только за счет частичного сжатия воздуха и поперечного расширения, которому препятствует лишь связность волокнистого каркаса. Доля поперечных деформаций при осевом нагружении уменьшается в процессе дренированных испытаний. В этом случае процесс сопровождается дополнительным уплотнением и упрочнением образца. При этом модуль общей деформации E интенсивно возрастает с повышением всестороннего давления до $\sigma \approx 0,4$ кГ/см², после чего остаточное поровое давление препятствует дальнейшему уплотнению образца, а рост величины E происходит с меньшей интенсивностью или вовсе прекращается.

Наиболее характерной особенностью деформирования торфа является возможность сохранения начальной структур-

ной прочности при больших значениях продольных и поперечных деформаций. В процессе недренированного осевого нагружения поперечное сечение возрастает пропорционально изменению высоты образца, ибо объем тела остается без изменения. И несмотря на это, разрушение образца наступает при значениях относительной деформации $\lambda \approx 0,4-0,5$. Характерно, что в процессе дренированного испытания разрушение наступает также при значениях λ , близких к указанным пределам. С ростом плотности образца, достигаемой всесторонним давлением $\sigma > 0,30 \text{ кГ/см}^2$, разрушение наступает при несколько меньших значениях λ .

Прочность образцов торфа при трехосных испытаниях обусловлена скоростью нагружения и деформирования, а также условиями дренирования. При открытых испытаниях образцов торфа на прочность в условиях стабилизации порового давления и медленного нагружения соблюдается условие прочности по Кулону. При закрытых или недренированных испытаниях влагонасыщенных образцов торфа, когда $U_w \approx \sigma$, прочность не зависит от величины внешнего давления, а угол внутреннего трения $\varphi \approx 0$.

Результаты трехосных испытаний образцов торфа позволяют сделать ряд замечаний по вопросу об оценке несущей способности торфяных оснований. При оптимальных условиях нагружения торфяной залежи до величины внешнего давления менее $0,40 \text{ кГ/см}^2$ процесс отжатия влаги протекает без аномальных явлений, поровое давление во времени снижается до нуля и вся внешняя нагрузка воспринимается скелетом грунта. Вследствие этого прочность системы возрастает пропорционально $\sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi$.

Внешнее давление свыше $0,40 \text{ кГ/см}^2$ сужает водопроводящие поры до размеров, при которых появление следов сдвиговой прочности влаги и явления кольтматации существенно снижают водопроницаемость системы и служат причиной сохранения остаточного порового давления. При повторном нагружении несущую способность подобной системы нужно определить по величине внешнего давления за вычетом порового давления, величина которого зависит от плотности грунта в рассматриваемый промежуток времени.

Поведение торфа при одноосном сжатии и отсутствии возможности бокового расширения существенно отличается от трехосных испытаний тем, что процесс протекает в направлении только увеличения плотности образца, без возможности бокового расширения. Поэтому компрессионные испытания

торфа следует рассматривать как метод изучения структуры и процессов отжатия влаги во времени и зависимости от приложенного давления, а также предельной деформируемости различных видов торфа с учетом явлений ползучести.

С указанных позиций были исследованы компрессионные свойства различных видов влагонасыщенного торфа на специальном многопозиционном компрессионном приборе. Опыты проводились в течение 4 месяцев со стабилизацией деформации образцов после каждой ступени нагрузки.

Сжимаемость образцов торфа неодинакова и зависит от структуры и состава. Повышенное содержание в торфе волокнистой массы при $R < 30\%$, обладающей сосудистым и клеточным строением, является причиной неизменного роста плотности вплоть до $\sigma \approx 3 \text{ кГ/см}^2$. Этот процесс обусловлен уменьшением содержания влаги межчастичного пространства и внутрисосудистых полостей. При высокой степени разложения (более $30-35\%$), особенно у низинных видов торфа, интенсивность процесса уплотнения резко снижается и при $\sigma > 1,5 \text{ кГ/см}^2$ почти прекращается. В данном случае указанное явление объясняется высокой начальной плотностью, низким содержанием биологически иммобилизованной влаги и агрегацией тонкодисперсных фракций, что способствует достижению более высокой плотности при малых давлениях.

У влагонасыщенного торфа средней и низкой степени разложения величина относительной деформации $\lambda_{\max}$ при $\sigma \approx 3 \text{ кГ/см}^2$ достигает $0,67-0,71$, в то время как при высокой степени разложения $\lambda_{\max} \approx 0,24-0,43$. Модуль деформации при этом возрастает пропорционально σ , что объясняется непрерывным ростом плотности торфа в процессе сжатия.

Процесс уплотнения торфа существенно интенсифицируется при совместном действии статической нагрузки и вибрации. Опыты, проведенные на виброустановке ВУ-15 с применением специальной матрицы, показали, что при оптимальной частоте вибрирования 50 гц и амплитуде колебания 1,6 мм начальную плотность торфа можно повысить вдвое.

Наибольшая интенсивность виброуплотнения наблюдается при давлениях до 1 кГ/см^2 , после чего вследствие роста числа контактов и трения скольжения частиц наступает затухание процесса, а при давлении более 3 кГ/см^2 влияние вибрирования практически прекращается.

Компрессионные испытания широко используются как процесс получения заданной влажности и плотности грунта при оценке его прочности (Н. Н. Маслов, В. Д. Ломтадзе

и др.) по теории Кулона. Закономерности изменения сдвиговой прочности торфа в зависимости от внешнего давления и состояния образца при одноосном сжатии и сдвиге подробно изучены в работах многих исследователей (И. И. Вихляев, Н. А. Наседкин, Ф. П. Винокуров с сотрудниками, А. Н. Лутохин, К. П. Лундин, А. Ф. Печуров, Н. Н. Морарескул, С. С. Овчинников, Н. П. Кузнецова и др.).

Основные недостатки работ указанных авторов исходят из отсутствия единой методики испытания, учитывающей факторы времени, напряженного состояния, структуры и состава исследуемого торфа. Применявшиеся в исследованиях конструкции сдвиговых приборов, как показали наши специальные исследования, не обеспечивают сохранение однородного напряженного состояния и плотности образца при сдвиге и исключают возможность полного среза образца торфа при степени разложения менее 30—35%.

Исходя из указанных недостатков и необходимости детального анализа процессов испытания торфа на сдвиг, были разработаны различные сдвиговые приборы с применением методов вращательного среза, прямого сдвига и тангенциального смещения пластинки. Опыты показали, что два последних метода пригодны лишь для испытания высокоразложившегося торфа. При испытании торфа низкой степени разложения необходимо создание надежного сцепления рабочих поверхностей прибора, что можно обеспечить применением игл.

Сопоставимыми испытаниями влагонасыщенных образцов установлено, что при степени разложения торфа менее 30—35% результаты прямого сдвига, особенно при малых давлениях уплотнения, оказываются завышенными в сравнении с вращательным и тангенциальным срезом примерно на 40—60%. Причина этого явления при сдвиге объясняется перемещением волокнистой массы к задней стенке неподвижного кольца с отжатием свободной влаги или уплотнением образца, что способствует дополнительному росту предельного напряжения сдвига.

Результаты испытания монолитов торфа с диаметром 500 мм при помощи вращательного среза показали, что при внешнем давлении $\sigma < 0,5 \text{ кГ/см}^2$ и постоянном коэффициенте пористости e зависимость между сопротивлением сдвигу τ и σ характеризуется семейством прямых, угол наклона которых обусловлен значением e . При этом с ростом плотности значения C и φ возрастают.

Во влагонасыщенных образцах прочность торфа не зависит от величины внешнего давления, а угол внутреннего трения $\varphi \approx 0$. В процессе отжатия влаги или уплотнения торфа, когда $W_t < W_n$, сопротивление сдвигу зависит от σ и W и может быть найдено по уравнению

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi (W, \sigma) + C (W).$$

Исходя из связи между сцеплением и влажностью, а также из предельной плотности торфа, характеризуемой первой критической точкой влагосодержания $W_{кр}$ или давлением $\sigma_{кр}$, найдено, что

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \frac{W_n - W_t}{W_t + W_{кр}};$$

$$C = \tau_n \frac{W_n}{W_t},$$

где τ_n — наиболее вероятное значение прочности, соответствующей полному влагонасыщению торфа, и W_t — его влажность.

Тогда предельное сопротивление сдвигу можно выразить уравнением

$$\tau = \tau_n \frac{W_n}{W_t} + \sigma \frac{W_n - W_t}{W_t + W_{кр}},$$

где $\sigma < \sigma_{кр}$; $\sigma_{кр} < 2 \text{ кГ/см}^2$.

IV. МАКРОСТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Макроструктура торфяной залежи обусловлена наличием напластований различных видов торфа, случайным характером распределения пор, структурных элементов и неоднородностей.

Макроструктура и механические свойства торфяной залежи изучались по комплексной методике исследований, что потребовало создания специальных полевых приборов с учетом специфических особенностей торфа.

В полевых исследованиях широко использованы методы вращательного среза и пенетрации, которые теоретически обоснованы многими авторами (П. А. Ребиндер, М. П. Воларович, В. Г. Березанцев, И. Керизель, В. А. Ярошенко, В. Ф. Разоренов и др.).

Проведенные ранее исследования поверхностного слоя торфяной залежи методом пенетрации (Н. А. Галыбин, В. Г. Горячкин, А. М. Григорьев, К. П. Лундин) и вращательного среза (А. Макфарлейн, Р. Харди, С. Томсон, А. Смит, Н. Янус) не затрагивают всю ее толщу и не учитывают влияние основного комплекса факторов на механические свойства.

Благодаря созданию портативных зондовых сдвигомеров СК-8 и пенетрометров П-4, автором впервые в нашей стране были широко исследованы механические свойства торфяной залежи по всей ее глубине.

В работе рассмотрены результаты послойного (через 25 см до полной глубины залежи) зондирования 17 торфяных месторождений различных типов строения Северо-западной, Средней и Уральской торфяно-болотных областей.

Во всех случаях полевые исследования механических свойств торфяной залежи сопровождались отбором образцов для определения влажности, степени разложения, химического состава, дисперсности, зольности, ботанического состава и других параметров (выполнены совместно с Н. Т. Королем, И. И. Лиштваном и В. Д. Копенкиным с сотрудниками).

Эти исследования позволили получить новые характеристики структурно-механических свойств торфяной залежи и дополнить существующие исследования в данной области, выполненные с позиции гидрологии, стратиграфии и водопроницаемости (К. Е. Иванов, С. Н. Тюремнов, В. В. Романов, А. В. Пичугин, Н. В. Чураев, Л. С. Евстафьев и др.).

В результате анализа полученного комплекса параметров торфяной залежи, обнаружено, что отдельные ее слои обладают характерными признаками, отличающими их между собой по плотности, прочности, катионному составу, дисперсности и др. По указанной причине целесообразно рассматривать структурно-механические свойства торфяной залежи, исходя из разделения всего пласта на деятельный, срединный, придонный и подстилающий слои.

Деятельный слой залежи обладает высоким газосодержанием, пониженной плотностью, влажностью и степенью разложения, вследствие чего ему присуща высокая сжимаемость. Срединный слой отличается от деятельного высокой влагонасыщенностью и степенью разложения, а структурно-механические его свойства всецело зависят от свойств слагающих пластов.

В этом слое важную роль играют прослойки сильно разложившихся торфов (шейхцериевые, пушицевые), обладающих

незначительным сцеплением. Указанные слои способствуют избыточному увлажнению соседних с ними пластов и возникновению плоскостей скольжения при обвалах и оползневых процессах.

Вследствие изложенных причин зондирование подобной торфяной залежи методами вращательного среза или пенетрации должно производиться более тщательно и часто.

Придонный слой залежи вследствие седиментационных и диффузных процессов, а также близости к минеральному основанию, обладает повышенной по сравнению со срединным слоем плотностью и содержанием минеральных компонентов. Указанный слой верховой залежи обладает повышенной прочностью. В низинной залежи это явление менее заметно.

Подстилающий слой торфяной залежи в подавляющем большинстве случаев состоит из плотных минеральных грунтов, не представляющих никакой опасности для устойчивости торфяного основания. Наличие в указанном слое органо-генных влагонасыщенных грунтов текущей консистенции типа сапропелей и илов вследствие малой их сжимаемости является причиной потери устойчивости торфяного основания и откосов осушителей, что требует детального анализа подстилающего слоя в процессе инженерного изыскания.

Макроструктура торфяной залежи является анизотропной по водопроницаемости вследствие преимущественно горизонтальной упаковки растений в процессе торфонакопления (К. Е. Иванов, А. В. Пичугин). Полевые и лабораторные исследования механических свойств торфа показали, что наиболее вероятные значения сопротивления сдвигу в горизонтальной τ_r и вертикальной τ_v плоскостях отличаются между собой в пределах 40—70% в зависимости от степени разложения и плотности. Поэтому торфяную залежь по механическим свойствам следует считать квазиизотропной системой, так как показатель анизотропии $K = \sqrt{\frac{\tau_v}{\tau_r}}$ не превышает 1,5.

Исследование макроструктуры верховой торфяной залежи указывает на наличие существенной вариации признаков прочности, обусловленной спецификой неоднородного строения торфа и наличием структурных элементов различной прочности. Наибольшая вариация признаков прочности наблюдается в неосушенных залежах, в которых коэффициент вариации в среднем по залежи достигает 30—35%. В процессе осушения этот коэффициент снижается до 20%, а в эксплуатируемой

или более плотной залежи коэффициент вариации не превышает 14%. Таким образом, с ростом плотности залежи вариация признаков прочности становится несущественной. Влияние степени разложения торфа на вариации его признаков также велико. С ростом степени разложения (>30%) структура торфа вследствие повышения плотности и разрушения прочных связей становится более однородной, а вариация признаков становится несущественной (менее 20%).

Наличие в залежи неоднородностей и дефектов макроструктуры является причиной изменения механических свойств торфа в зависимости от размера деформируемого объема или поверхности.

Эти вопросы применительно к естественным условиям залегания залежи экспериментально не изучены. Имеются лишь данные по исследованию прочности горных пород и кускового торфа в зависимости от размеров образца (К. В. Руппенейт, М. М. Протодьяконов, Н. П. Перов, Г. И. Кужман, Л. М. Малков и др.).

С целью изучения влияния указанного фактора на прочность торфяной залежи проводились полевые испытания природных монолитов на сдвиг при изменении площади среза в пределах от 0,002 до 1 м². Опыты показали, что в указанных пределах изменения сечения монолитов прочность с ростом размеров снижается в среднем на 20—30%, что подтверждает общность рассматриваемых явлений в различных горных породах. Эмпирически связь между прочностью и площадью среза F в м² с учетом прочности бездефектной поверхности τ ($F \leq 0,04$ м²) выражается экспоненциальной зависимостью

$$\tau_F = \tau e^{-\alpha F}.$$

Результаты зондирования различных типов строения торфяной залежи позволили накопить достаточное количество информации (более 10 тысяч измерений) и произвести их обработку методами математической статистики и теории вероятности.

Кривые распределения прочности неосушенных залежей верхового и низинного типа при их сопоставлении с теоретической и проверки сходимости по критерию Пирсона указывают на возможность принятия нормального распределения. Наиболее вероятные значения прочности τ_n при этом составляют для верховых залежей 0,110 кГ/см², а для низинных — 0,154 кГ/см².

Исходя из рассмотрения структуры и водных свойств тор-

фа, установлено, что наиболее вероятное значение прочности торфа соответствует его состоянию при природном влагонасыщении. Меньшие значения τ_n по левой ветви кривой распределения обусловлены избыточной увлажненностью и наличием дефектов структуры, а большие — неполным влагонасыщением и влиянием высокопрочных структурных элементов.

Существенная вариация признаков прочности, характеризующая высокими значениями коэффициента вариации (36,4%) и среднеквадратического отклонения (0,041—0,056 кГ/см²), объясняется охватом широкой гаммы разновидностей залежей, обладающих разнообразным строением и свойствами.

В доверительных интервалах отклонения τ ($\pm 2\sigma$) или вероятности 95,5% прочность низинных типов строения залежи колеблется в пределах от 0,04 до 0,27 кГ/см², а верховых типов — от 0,02 до 0,19 кГ/см². Более высокая прочность низинных типов залежей объясняется повышенной их природной плотностью. Построение кривых распределения прочности торфа в узких интервалах степени разложения не изменяет характера нормального распределения, но позволяет подойти к решению задачи более конкретно. Зависимость наиболее вероятных значений прочности τ_n верховых и низинных видов торфа от степени разложения R указывает на численное совпадение τ_n до $R \leq 20—25\%$, после чего снижение прочности верхового торфа происходит более интенсивно, чем низинного (см. таблицу 7). Разрушение волокнистого каркаса в обоих случаях приводит к снижению прочности торфа. Однако в низинном торфе оно компенсируется последующей агрегацией частиц и ростом плотности, а в верховом эти явления менее заметны вследствие повышенной кислотности, тормозящей реакции обмена.

Из многих параметров торфа наибольшее влияние на прочность оказывает влажность, роль которой проявляется в виде фактора набухания и разупрочнения структурных элементов и пассивного заполнителя порового пространства, снижающего или исключаящего силы взаимодействия между частицами.

Экспериментально установлена тесная взаимосвязь между влажностью W и прочностью τ , что характеризуется при заданной степени разложения постоянством произведения этих параметров, то есть

$$W_1 \tau_1 \approx W_2 \tau_2 \approx \text{Const}$$

Исходя из рассмотрения кривых распределения прочности торфа и учитывая, что наиболее вероятная прочность τ_n соот-

ветствует влажности торфа при полном влагонасыщении W_n можно найти величину прочности τ при данной влажности W_t по уравнению

$$\tau = \tau_n \frac{W_n}{W_t}$$

Полученное выражение является уравнением равнобочной гиперболы и характеризует закон изменения прочности с учетом не только влажности, но и степени разложения, так как между W_n и степенью разложения торфа R существует хорошая корреляционная связь (Ф. И. Коваленко).

$$W_n = \frac{100(95 - mR)}{5 + mR},$$

где $m=0,10$ и $0,20$ соответственно для верхового и низинного торфа. Таким образом, полученное выше уравнение можно записать с учетом R и W_t

$$\tau = \tau_n \frac{100(95 - mR)}{5 + mR}.$$

Сопоставление значений τ , полученных экспериментальным путем и расчетом, указывает на хорошую их сходимость и позволяет рекомендовать это уравнение для расчета природной прочности торфяной залежи, но без учета внешней нагрузки. То есть τ , определяемое этим уравнением, представляет собой сцепление торфа при заданной его влажности и степени разложения.

Допуская наличие линейной связи между прочностью и степенью разложения R торфа, можно пользоваться уравнением семейства прямых, характеризуемых критической $W_{кр} \approx 250\%$ и текущей влажностью

$$\tau = \tau_0 - \tau_t = \frac{W_{кр}}{W_t} - \frac{k}{W_t} R,$$

где $K=0,038$ и $0,022$ соответственно для верхового и низинного торфа. В этом случае τ_0 характеризует прочность неразложившегося торфа ($R \approx 0$) при данной влажности.

Определение прочности торфяной залежи в полевых условиях сопровождалось также оценкой сопротивления сдвигу нарушенной структуры, что достигалось путем повторного поворота крыльчатки в разрушенном объеме торфа.

Статистическая обработка результатов более 5 тыс. измерений показала, что между значениями сопротивления сдвигу

торфа нарушенной и ненарушенной структуры существует тесная корреляционная связь, оцениваемая коэффициентом корреляции $r=0,965$.

При степени разложения верхового торфа $R_1 < 20\%$ и $R_2 > 20\%$ уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\tau_{r1} = 0,602\tau + 0,014,$$

$$\tau_{n2} = 0,584\tau - 0,016.$$

Для низинных торфов в интервале $R=15-55\%$ получено уравнение регрессии

$$\tau_n = 0,544\tau + 0,012.$$

Таким образом, индекс чувствительности торфа в природной залежи, представляющий собой отношение τ к τ_n близок к двум.

Результаты исследования макроструктуры и прочности торфяной залежи в естественном залегании с применением комплексной методики испытания и специально разработанных конструкций портативных полевых приборов позволили впервые рассмотреть наиболее вероятные количественные признаки структурно-механических свойств торфяного пласта без нарушения природной его структуры и разработать достоверные расчетные зависимости изменчивости этих свойств методами математической статистики. В данном случае основными факторами, характеризующими структурно-механические свойства торфяной залежи являются влажность, степень разложения и кислотность. Изменение прочности торфа в целом

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЕРХОВЫХ ВИДОВ ТОРФА

Виды торфа	Глубина слоя, м	Степень разложения R, %	Коэффициент пористости ϵ	Влажность W, %	Время разрушения t, час	Предельный угол разрушения α_p	Длительная и мгновенная прочность кГ/см ²		$\frac{\tau}{\tau_0}$
							τ_0	τ	
Пушицево-сфагновый	0,4	20	20	1300	105	60	0,14	0,23	1,64
То же	1,5	25-30	19	1250	85	58	0,14	0,19	1,36
Шейхцеровый	2,5	40-45	16	1080	75	49	0,08	0,12	1,50

следует рассматривать как процесс, протекающий под действием микробиологического распада и химических превращений исходных продуктов торфообразования, сопровождающихся изменением водных свойств и структуры торфа с учетом интенсивности протекания реакции обмена и минерализации системы.

У. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ И ПОЛЗУЧЕСТЬ ТОРФА И ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Длительно развивающиеся деформации и снижение прочности органических дисперсных систем во времени обусловлены сложными внутренними и поверхностными явлениями, определяющимися характером переноса вязкой жидкости в узких порах и развитием временного процесса в микрообъемах под действием тепловых флуктуаций и механических напряжений (П. А. Ребиндер, Б. В. Дерягин, С. В. Нерпин, С. Н. Жуков, Г. М. Бартенев). Структура и состав торфа отличаются значительной неоднородностью, наличием множества дефектов и случайного распределения частиц и пор по размерам, поэтому практически исключается возможность рассмотрения явлений ползучести и временного процесса в строгой форме.

Попытки оценить длительную прочность даже неразложившихся волокон торфообразователей (см. таблицу 2) не увенчались успехом из-за существенной вариации признаков прочности (коэффициент вариации достигает 60%). Поэтому применимость термоактивационной теории прочности по Журкову-Бартеневу для определения долговечности волокон торфа и энергии активации молекулярных связей встречает непреодолимые трудности. По указанной выше причине также не удается оценить функцию податливости или меру ползучести волокон по Вену-Шарма и Н. Х. Арутюняну.

С переходом к оценке реологических свойств системы в целом затрагиваемые явления становятся менее определенными. При отсутствии влияния волокнистого каркаса или диспергировании торфа реологические его свойства возможно описать аналитически (М. П. Воларович, П. К. Шипанов, Н. И. Малинин и др.). Однако, вопросы реологии торфяных систем ненарушенной структуры вследствие сложности протекающих процессов остаются все еще мало изученными и настоятельно требуют дальнейшего развития, особенно в направлении разработки совершенных приборов и измеритель-

ной аппаратуры (Ф. П. Винокуров, Н. А. Цытович, А. Е. Теркин, М. А. Питерман).

В диссертационной работе реологические свойства торфа изучены лабораторными и полевыми методами.

Лабораторные исследования выполнены на калцевых приборах (С. С. Вялов, Я. Л. Коган, С. Р. Месчан), оснащенных устройством для получения скоростей сдвига в широких диапазонах. Длительная прочность и ползучесть пластов торфяной залежи верхового типа изучались одновременно при постоянной нагрузке и ступенчатом нагружении с различными интервалами времени, вплоть до стабилизации деформации после каждой степени нагрузки.

Полевые исследования проводились с помощью специально разработанных зондовых приборов, оснащенных четырехлопастными, конусными и плоскими наконечниками. В данном случае конструкции приборов позволили впервые проводить исследования реологических свойств залежи на любой ее глубине без нарушения естественной структуры и без пробуривания скважин, что существенно повышает надежность результатов испытания и значительно сокращает число трудоемких операций по сравнению с существующими методами.

Результаты полевых исследований показали, что в условиях затухающей ползучести торф низкой и высокой степени разложения обладает различной деформируемостью. Стабилизация деформации во времени наступает у торфа низкой степени разложения быстрее из-за наличия волокнистого каркаса и высокой водопроницаемости. Из данных таблицы 4 следует, что с ростом степени разложения предельная деформация или угол поворота крыльчатки при разрушении уменьшается, а стадия разрушения при стабилизированных испытаниях наступает быстрее. Во всех случаях наблюдается существенное снижение прочности торфа при длительных испытаниях по сравнению с быстрым сдвигом. В среднем это снижение для исследованных торфов составляет 36—64%.

С уменьшением скорости нагружения (таблица 5) снижение прочности происходит главным образом в течение 5—6 часов, так как структурообразовательные процессы в деформируемом объеме завершаются за указанный промежуток времени. Вполне очевидно, что с ростом деформируемого объема время стабилизации будет возрастать пропорционально его размерам.

Протекание в торфе временного процесса при столь высоких влажностях ($> 1000\%$) и малой плотности всецело объяс-

Таблица 5

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ
И ДЕФОРМАЦИЮ КОМПЛЕКСНО-ВЕРХОВОГО ТОРФА — R=25%

Параметры	Интервалы нагружения в мин. по ступеням через 0,02 кГ/см ²						
	Быстрый за 1 мин.	2	5	15	30	60	1200 (стабили- зация)
Скорость нагруже- ния V_{τ} $\frac{\text{кГ/см}^2}{\text{час}}$	1,2	0,60	0,24	0,08	0,04	0,02	0,007
Предельный угол разрушения α_p^0	48	60	64	68	70	74	77
Прочность τ_t	0,23	0,21	0,20	0,18	0,16	0,14	0,14

няется влиянием волокнистого каркаса, ибо при отсутствии последнего система переходит в текучее состояние. Исходя из указанного факта, длительную прочность торфа можно рассматривать как результат одновременного участия волокон в акте разрыва, преодоления сил трения скольжения и вязкого течения и перераспределения напряжений в структурных элементах во времени.

В результате обработки данных полевых исследований установлена линейная зависимость между прочностью τ_t и логарифмом скорости нагружения $\lg V_t$

$$\tau_t = \tau_{\infty} + b \lg V_t,$$

где τ_{∞} характеризует длительную прочность торфа при $V_t \rightarrow 0$.

Для предварительных расчетов можно принять

$$\tau_{\infty} = (0,6 - 0,7) \tau,$$

где τ характеризует прочность торфа, определяемую по методике быстрых испытаний при помощи полевого сдвигомера СК-8 или пенетрометра П-4.

Ползучесть торфа, исследованная методами вращательного среза, пенетрации и погружения плоских штампов, характеризуется четырьмя фазами: условномгновенная, упругого, последовательного, ползучести и прогрессирующего течения.

Результаты полевых исследований торфа подтверждают выводы ряда авторов о наличии стадии затухающей ползуче-

сти грунтов при напряжениях, не превышающих предельного напряжения сдвига при длительном нагружении (С. С. Вялов, С. Р. Месчан). В этих условиях справедливость уравнения Ребиндера-Фукада сохраняется, поэтому деформацию торфа при лопастных испытаниях можно выразить

$$\alpha_t = \alpha_0 + k \lg t = 5 + 9 \lg t \pm 5.$$

Для приближенной оценки времени, при котором наступает разрушение системы, то есть при $\alpha_t = \alpha_p$ можно пользоваться уравнением

$$\lg t = \frac{\alpha_p - \alpha_0}{k},$$

где α_p колеблется в пределах 30—50° в зависимости от плотности и степени разложения торфа.

Сопоставление результатов длительных лопастных и пенетрационных испытаний показывает их идентичность и численное совпадение величин предельного напряжения сдвига ($\tau \approx \Theta$). В связи с этим полученное уравнение при пенетрации торфа ненарушенной структуры в виде

$$\Theta_t = \Theta_0 - m \lg t$$

можно записать с учетом параметров лопастного испытания

$$\tau_t = \tau_0 - m \lg t.$$

Экспериментально установлено, что параметр m зависит от степени разложения или переработки торфа. Для торфа степени разложения менее 25—30% $m=0,011$, а при высокой степени разложения или переработке торфа $m=0,004$.

Так как τ_0 представляет собой условномгновенное значение прочности, определяемое при быстром сдвиге, то можно воспользоваться ранее выведенными уравнениями и записать для ненагруженного торфа

$$\tau_t = \tau_n \frac{W_n}{W_t} - m \lg t,$$

с учетом внешнего давления

$$\tau_t = \tau_n \frac{W_n}{W_t} + \sigma \frac{W_n - W_t}{W_t + W_{кр}} - m \lg t,$$

с учетом состава и степени распада торфа

$$\tau_t = \sigma_{pm_0} \frac{(1 - R_0)^{2n}}{(1 - R_0 + \varepsilon)} + \Theta_r(W) - m \lg t.$$

В последнем уравнении $\Theta_r(W)$ характеризует предельное напряжение сдвига мелко раздробленных и тонкодисперсных фракций торфа. При испытании указанных фракций торфа в кольцевом приборе со скоростями сдвига 30; 200; 1200; 1400 и 1800 мм/час обнаружено, что с ростом плотности образца явления длительно развивающихся структурных изменений становятся более заметными. При коэффициенте пористости $\varepsilon \leq 8$ между логарифмом прочности $\lg \tau$ и времени $\lg t$ обнаружена линейная зависимость.

$$\lg \tau_t = a - b \lg t,$$

которая может служить основанием для приближенной оценки длительной прочности мелко раздробленных фракций торфа при известных значениях a , зависящих от плотности образца и внешнего давления. При коэффициенте пористости испытанных образцов $\varepsilon \approx 5,5$, что близко соответствует стабилизированному состоянию верховых торфяных оснований насыпей с ростом продолжительности испытания от 0,006 до 1 часа прочность системы снизилась от 0,43 кГ/см² до 0,32 кГ/см², то есть в 1,34 раза.

Изменение прочности во времени обнаружено также при испытании по вышеуказанной методике у переработанных и непереработанных волокон, отмытых из природного торфа.

Результаты длительных испытаний торфа в залежи и на образцах различной структуры, состава и плотности позволяют внести в существующие расчетные схемы по определению несущей способности и деформируемости торфяного основания фактор времени и прогнозировать эти процессы. А конструкции новых приборов существенно облегчают решение задач в области экспериментального исследования ползучести и длительной прочности торфа непосредственно в полевых условиях и на лабораторных образцах.

VI. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Изучению напряженного состояния и деформируемости торфяной залежи под действием внешних нагрузок и собственного веса посвящено множество работ. Однако до сих пор торфяная залежь рассматривалась не с единой позиции, а с учетом узкоотраслевых требований, без достаточного учета параметров структуры торфа и объемно-напряженного состояния.

При оценке проходимости машин по поверхности торфяной залежи (Н. А. Наседкин, Ф. А. Опейко, А. М. Григорьев, М. В. Мурашов, С. С. Корчунов и др.), ее с достаточным приближением рассматривают как линейно-деформируемое упругое полупространство без учета явлений ползучести и распределения напряжений и деформаций по всей глубине основания.

Оценка же осадки торфяной залежи при осушении дастся исходя из учета собственного ее веса и гидродинамических явлений во времени (В. М. Зубец, А. И. Мурашко, Е. А. Коновалов, Ю. Остроменский, Б. В. Астапович и др.), но без влияния внешней нагрузки.

Более обобщенно и полно механические свойства торфяной залежи рассматриваются при возведении на торфе гидротехнических сооружений (И. И. Вихляев, А. Ф. Печкуров, К. П. Лундин, А. Ф. Цыганков, А. Е. Тетеркин и др.), строительстве насыпей железных (К. С. Ордянец, Г. М. Шахунянц, Н. Н. Сидоров, А. А. Ткаченко, М. А. Шапошников и др.) и автомобильных дорог (Н. Н. Иванов, В. Ф. Бабков, Н. П. Кузнецова, П. А. Дрозд, И. Е. Евгеньев, В. Д. Казарновский и др.). В данном случае предполагается, что напряжения по глубине залежи постоянны, а осадка протекает главным образом за счет отжатия влаги. Явлениями ползучести и снижения во времени прочности стабилизированного основания при этом пренебрегают. Здесь также не учитываются особенности структуры и состава торфа.

В данном разделе диссертации вопросы перераспределения напряжений в залежи и ее деформационные свойства при различных условиях нагружения изучены с привлечением комплексной методики исследования и применением комплекта полевых приборов, предназначенных для непосредственного измерения основных параметров залежи.

Влияние процессов осушения и нагружения на торфяную залежь изучалось на опытном участке Оршинского торфомассива. Исследования проводились на пяти опытных площадках с размерами в плане 10 на 20 м. Указанные площадки полойно были оснащены специальными приборами для измерения по глубине залежи общих напряжений, порового давления и деформаций (месдозы, керамические датчики, индукционный зонд и репера). Прочность слоев залежи определялась при помощи зондового сдвигомера СК-2 и пенетromетра П-1. На одной площадке были созданы вертикальные дрены через 1 м до полной глубины залежи, а на другой производилось нагру-

жение при давлении $0,20 \text{ кГ/см}^2$. Остальные площадки служили контролем и подвергались лишь действию осушения.

Четырехлетние наблюдения за изменениями свойств опытных площадок позволили оценить параметры фильтрационной консолидации и ползучести, а также плотность и механические свойства до стабилизации осадки.

Анализ полученных результатов позволил выявить ряд специфических особенностей торфяной залежи. Обращает на себя внимание существенное отличие в сжимаемости пластов. Наиболее сильно сжимаются оводненные слои, особенно прилегающие к пограничному горизонту, расположенному на глубине 1,1 м. Относительные деформации отдельных слоев отличаются между собой в два с лишним раза, что указывает на необходимость послойного учета сжимаемости при расчете общей осадки залежи (Н. А. Цытович).

Наблюдения также показали, что в процессе осушения и нагружения упрочнение залежи в основном завершается в течение 1—1,5 лет. При этом прочность залежи за счет осушения возрастает примерно в 2—2,5 раза, а при дополнительном уплотнении давлением $0,20 \text{ кГ/см}^2$ — в 3—3,5 раза. Характерно, что эффект дренирования залежи довольно близок к процессу упрочнения под действием указанного давления.

Осадка торфяной залежи под действием осушения и нагружения происходит с наибольшей интенсивностью в начальный период, из-за наличия в ней крупных водопроводящих пор. Этот процесс, названный начальным периодом фильтрационной консолидации, длится в течение 5—6 суток и соответствует изменению коэффициента пористости по сравнению с начальным в среднем на 20%.

При создании в залежи вертикальных дренах цилиндрического сечения процесс осадки по сравнению с контрольной ускоряется в 2,5—3 раза, что указывает на высокую эффективность дренирования. Указанное явление можно объяснить сокращением пути фильтрации и созданием свободной гидравлической связи между аномально фильтрующими слоями (С. Г. Солопов, Н. В. Булаевский, Н. В. Чураев, С. С. Корчунов).

Основная часть осадки торфяной залежи на опытных площадках завершалась в течение 300 суток, и этому сроку соответствовала стабилизация порового давления или его снижение до минимума. Очевидно, дальнейшую осадку залежи можно принять при этом за фазу затухающей ползучести.

Рассмотрение различных фаз уплотнения торфяной залежи

указывает на отсутствие возможности определения величины осадки по теории фильтрационной консолидации с применением начальных или средних коэффициентов пористости, сжимаемости и фильтрации. Удовлетворительно процесс осадки во времени описывается гиперболическим законом с учетом конечной осадки и скорости уплотнения.

Закономерности уплотнения торфяной залежи с применением дренирующих полостей, заполненных крупнозернистым песком, являются более сложными и требуют детального изучения напряженного состояния и кинетики развития деформаций с учетом комплекса параметров структуры и механических свойств основания. Эти вопросы были изучены в условиях Оршинского верхового торфомассива, при глубине залежи около 3 м.

В полосе шириной 35 м между глубокими канавами были созданы щелевые дренаи поперек канавам при помощи дренажной машины с цепным баром конструкции профессора Солопова С. Г. Щелевые дренаи шириной 0,1 м и глубиной 2,5 м располагались на расстоянии друг от друга через 1, 2, 3 и 4 метра и заполнялись крупнозернистым песком. Опытный участок уплотнялся под действием насыпи, высотой 2 м, шириной по низу 10 м и длиной 40 м. Опыты проводились также по комплексной методике и полевыми приборами, использованными при исследовании рассмотренных выше опытных площадок.

В таблице 6 приведены численные значения характеристик залежи на глубине 1 м в участках основания с песчаными дренами (через 1 м) и без дрена. Характеристики по слоям и другим участкам подробно рассмотрены в диссертации.

Из таблицы 6 следует, что при давлении от веса насыпи $\sigma \approx 0,4 \text{ кГ/см}^2$ дренирование залежи за рассматриваемый промежуток времени не только не ускоряет, а наоборот, замедляет процесс осадки (25 см) по сравнению с контрольным участком (34 см). При отсутствии в основании дрена снижение влажности протекает менее интенсивно, несмотря на большую осадку, что прямо указывает на явление выдавливания торфа из-под основания. На контрольном участке процесс уплотнения сопровождается существенным начальным ростом порового давления и малой интенсивностью его снижения во времени. Применение в основании дрена почти вдвое снижает величину порового давления, что приводит к росту эффективных напряжений и, как следствие, повышению прочности залежи. В данном случае прочность в основании с дренами за 28 дней возросла примерно в 4,5 раза, а на контрольном участке — в

2,7 раза, то есть дренирование за рассматриваемый промежуток времени повысило прочность основания вдвое, что имеет важное значение для интенсификации процессов возведения насыпей и создания высокой несущей способности залежи.

Таблица 6

**РЕЗУЛЬТАТЫ УПЛОТНЕНИЯ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАСЫПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЩЕЛЕВЫХ
ПЕСЧАНЫХ ДРЕН**

Параметры залежи	Изменения параметров опытных участков во времени, в сут.							
	начальные		6		12		28	
	дрени- рован- ный	конт- роль- ный	дрени- рован- ный	конт- роль- ный	дрени- рован- ный	конт- роль- ный	дрени- рован- ный	конт- роль- ный
Влажность, W %	920	920	840	880	785	825	660	780
Коэффициент по- ристости, ε	15,9	15,9	13,4	14,1	12,8	13,4	10,7	12,7
Осадка h, см	0	0	18	26	21	30	25	34
Поровое давление, U_w кГ/см ²	0,03	0,07	0,11	0,20	0,08	0,18	0,07	0,17
Прочность τ кГ см ²	0,12	0,12	0,20	0,16	0,29	0,20	0,55	0,32

В результате проведенных исследований удалось раскрыть механизм структурообразовательных процессов в деформируемой залежи с наличием песчаных дрен, а также осветить принципиальные стороны дебатированного вопроса об эффективности применения песчаных дрен в слабых грунтах (Н. А. Цытович, М. Ю. Абелев, И. Е. Евгеньев, А. А. Ткаченко, А. С. Марченко, Е. Казагранде, Д. Карпентер и др.).

Основная причина возникших споров, на наш взгляд, кроется в методике испытания и технологии закладки дрен. Разумеется, что при задавливании в торфяную залежь обсадной трубы большого диаметра вертикальные стенки дрен существенно уплотняются, вследствие чего значительно снижается их водопроницаемость и работоспособность самих дрен. При отсутствии явления уплотнения стенок дрен, как это имело место в наших опытах или при технологии дренирования методом размыва (Е. Казагранде), соблюдается хорошее совпадение теории с практикой (Н. А. Цытович).

Результаты натурных исследований показывают, что эффективность дренирования торфяных оснований следует рассматривать с позиции его уплотнения и упрочнения во времени с учетом изменения порового давления и прочности. Оценка же процесса лишь по величине осадки залежи может привести к ложным результатам, ибо на практике мало обращается внимания на природу возникновения общих деформаций или поперечного расширения основания.

Значительное влияние оказывает на фильтрационную консолидацию торфяной залежи ее состав и структура. Наличие одинаковой водопроницаемости при различной дисперсности и плотности торфов указывает на необходимость учета структуры и степени распада торфа. Поэтому нельзя согласиться с тенденцией рассматривать торф как единую систему, характеризующуюся средними параметрами.

Существенное отличие фильтрационных свойств торфа от минеральных грунтов заключается в том, что общая его структура обусловлена соотношением грубо- и тонкодисперсных фракций, а также особенностями структуры элементов твердой фазы. С ростом внешнего давления и снижения порового давления влаги межчастичных пор в поле напряжений вовлекаются сами волокна, деформирование которых вызывает дополнительное отжатие воды сосудистых пор. И так как стенки волокон обладают вязко-пластичными свойствами, то весь процесс уплотнения будет сопровождаться ползучестью волокон, хотя при этом отжимается достаточное количество свободной влаги. Следовательно, ползучесть скелета торфа в отличие от минерального грунта вызвана как вязко-пластическими деформациями стенок самих частиц, так и временными процессами при их скольжении и упаковке.

При распаде торфа наблюдается повышение поверхностной активности и шероховатости частиц с преобладанием в системе гидрофильных коллоидов, что оказывает существенное влияние на процесс уплотнения и отжатия влаги из-за образования вторичных гелевых структур и коагуляции водопроводящих пор.

Исходя из приведенных выше замечаний, вопросы фильтрационной консолидации и ползучести торфа можно рассматривать с позиций механики минеральных грунтов только с учетом специфики строения и состава торфа при различной степени распада исходных продуктов. Это замечание в первую очередь касается значения коэффициента пористости, который харак-

теризует водопроницаемость торфа различной степени разложения неоднозначно.

При рассмотрении механических свойств торфяной залежи наибольший интерес представляют вопросы определения предельного состояния равновесия и модуля деформации с учетом особенностей структуры и водных свойств торфа. Теоретические предпосылки к решению задачи предельного состояния равновесия грунтов базируются в большинстве случаев на допущении теории пластичности о необратимом изменении формы при неизменном объеме грунта (В. В. Соколовский, В. Г. Березанцев, В. А. Флорин). В этом случае задача определения несущей способности идеально связанного ($\varphi=0$) грунта решается с учетом его сцепления при заданной неизменной во времени влажности и плотности. Исходя из результатов трехосных испытаний торфа, можно установить, что допущение об идеально связанном состоянии или при $\varphi \approx 5-6^\circ$ может быть справедливым при природной влагонасыщенности торфяной залежи и частично при повторном уплотнении стабилизированного основания в начальный период действия внешнего давления. Рассмотренные условия имеют важное значение при выборе темпов нагружения и величины внешнего давления, действующего на залежь. Критическую нагрузку, определяющую предельное состояние равновесия залежи с учетом указанных допущений, можно определить по простейшей зависимости

$$\sigma_{кр} = mC,$$

где $m=3-4$ и зависит от глубины залежи и ширины нагрузки; C — сцепление торфа при данной плотности и влажности, которое определяется по предложенному в IV разделе уравнению ($C=\tau$) методом вращательного среза или пенетрации.

Теоретический анализ зависимости между коэффициентом пористости e , относительной деформацией λ и влажностью W показывает, что указанные зависимости могут быть также оценены с учетом параметров прочности τ торфа.

Принимая для влагонасыщенного торфа

$$e = \rho W; \quad \lambda = \frac{\epsilon_{II} - e}{1 + \epsilon_{II}}$$

и пренебрегая малой величиной ρ^{-1} по сравнению с W , можно найти текущее значение влажности W по начальному ее значению W_{II}

$$W = W_{II} (1 - \lambda).$$

Как было показано выше, $\tau W = \tau_{II} W_{II}$; тогда можно записать

$$\tau_{II} \frac{W_{II}}{\tau} = W_{II} (1 - \lambda); \quad \lambda = 1 - \frac{\tau_{II}}{\tau}.$$

Таким образом, модуль сжатия можно определить по уравнению

$$E_{сж} = \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\sigma}{1 - \frac{\tau_{II}}{\tau}}.$$

Общий модуль деформации торфяной залежи с учетом влияния бокового давления и поперечных деформаций β на процесс уплотнения определяется по уравнению

$$E_{об} = \beta E_{сж} = \beta \frac{\sigma}{1 - \frac{\tau_{II}}{\tau}}.$$

Полученное уравнение с учетом компрессионных свойств торфа и предельной относительной деформации λ_{max} при $\sigma \rightarrow \infty$ можно вывести из зависимостей

$$\lambda = \lambda_{max} \frac{\sigma}{\sigma + \sigma_0}; \quad E_{сж} = E_0 + \frac{\sigma}{\lambda_{max}},$$

где $\sigma_0 = \lambda_{max} E_0$; E_0 — начальный модуль деформации, определяемый по методике, предложенной А. С. Королевым.

Определяя значения $\frac{\tau_{II}}{\tau}$ и σ из предыдущих и последних уравнений, можно найти модуль общей деформации

$$E_{об} = \beta \frac{\sigma_0 \tau}{\tau (\lambda_{max} - 1) + \tau_{II}} = \beta \frac{E_0 \lambda_{max}}{\lambda_{max} - 1 + \frac{\tau_{II}}{\tau}}.$$

Значение E_0 и β приведены в таблице 7 в зависимости от типа строения залежи и степени разложения, что позволяет с достаточной для практики точностью определить один из наиболее важных параметров торфяного основания $E_{об}$ с учетом факторов его прочности и максимальной относительной деформации.

Деформируемость торфяной залежи под действием кратковременных нагрузок через плоские и круглые штампы и распределение при этом напряжений в активной зоне основания представляют самостоятельный интерес для оценки проходности машин с различной опорной поверхностью.

Эти вопросы исследовались также по комплексной методике на верховой залежи с наличием в верхнем слое малоразложившегося горизонта сфагнового торфа.

Деформации слоев активной зоны измерялись при помощи специального автоматического глубинного репера, а общие напряжения — месдозами. Для измерения потенциала влаги или порового давления использовались влагопотенциометры конструкции С. С. Корчунова.

Полевые исследования процессов уплотнения поверхности торфяной залежи под штампами и катками показали, что вследствие высокой сжимаемости торфа поровое давление возрастает вслед за деформацией за весьма короткий промежуток времени, измеряемый несколькими секундами. Отрицательные значения порового давления (капиллярное) быстро стремятся к нулю, указывая на интенсивное удаление из пор воздуха и уменьшение поверхности раздела фаз. При этом чем выше влажность торфа, тем при меньших значениях внешней нагрузки наблюдается появление в порах торфа избыточного давления влаги. В подавляющем большинстве случаев это явление в верхнем горизонте деятельного слоя происходит при давлении свыше $0,11 \text{ кг/см}^2$, что очень близко к величине структурного сцепления торфа.

Результаты изучения напряженного состояния и деформируемости торфяной залежи под действием внешней нагрузки и собственного веса и разработанные для этих целей конструкции приборов позволяют более точно оценить кинетику развития основных процессов, выбрать наиболее оптимальные режимы нагружения и разработать более совершенные схемы расчета и пути повышения несущей способности и осадки с учетом различных условий дренирования и свойств залежи.

VII. ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ И РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Технологическая последовательность освоения торфяных месторождений в топливной промышленности, сельском хозяйстве и строительстве затрагивает такие общие вопросы, как инженерно-геологическое изыскание, производство подготовительных и мелиоративных работ, расчеты несущей способности, осадки и устойчивости и другие.

Вследствие подобной общности различных направлений использования торфяных месторождений возникает необходи-

мость создания единой методики изучения структурно-механических свойств залежи с применением комплекса лабораторно-полевых приборов.

Конкретно единая методика должна исходить из таких основных параметров залежи, какими являются влажность, степень разложения, зольность, параметры прочности S и φ , модуль деформации, глубина залежи и кислотность.

Численные значения этих параметров и их изменчивость во взаимосвязи с влажностью и степенью разложения представлены в обобщенной таблице 7. В таблице указаны созданные нами приборы для определения всех представленных в ней параметров. Конструкции приборов в настоящее время опробованы и испытаны достаточно полно, а некоторые из них (СК-8, П-4, УВД-5) уже широко используются в инженерных изысканиях слабых органических и минеральных грунтов.

Параметры R , τ_v , W_n и ϵ_n в данной таблице представлены наиболее вероятными величинами, определяемыми статически. Поэтому применение этих величин в расчетах должно сопровождаться учетом коэффициента вариации, колеблющегося в пределах от 14 до 36%.

Приведенные в таблице 7 параметры торфа могут послужить основанием для выбора конкретных решений при оценке прочностных свойств и сжимаемости торфяных оснований и откосов осушителей. Численные значения этих параметров позволяют вести сравнительный анализ поведения торфяной залежи по основным характеристикам торфа: влажности, коэффициенту пористости и степени разложения с учетом видового состава и кислотности. Полевые же приборы позволяют существенно снизить трудоемкость проводимых по существующей методике операций и повысить надежность получаемых результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают, что изменчивость структурно-механических свойств природного торфа обусловлена влиянием микробиологического распада и химических превращений исходных продуктов торфообразования, сопровождающихся усилением ионообменных процессов, минерализацией системы и высвобождением значительного количества неподвижной влаги вследствие разрушения сосудистых и клеточных полостей.

ПАРАМЕТРЫ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРФЯНЫХ
МЕТОДЫ ИХ

Параметры	Верховая залежь						
Степень разложения R, %	5-10	10-15	15-25	25-30	30-40	40-45	45-65
Вероятная прочность $\tau_v, \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$	0,10	0,11	0,13	0,10	0,08	0,06	0,04
Влажность при насыщ. $W_n, \%$	1500	1400	1300	1200	1100	1030	1000
Начальный коэффициент пористости e_n	25,0	23,0	21,0	19,0	16,0	15,0	14,0
Предельный коэффициент пористости e_k	5,0	5,0	4,2	4,2	3,2	3,2	3,0
Начальный модуль деформации $E_0, \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$	0,57	0,58	0,60	0,62	0,69	0,68	0,71
Показатель бокового расширения β	0,98	0,98	0,95	0,93	0,89	0,86	0,82
Коэффициент бокового давления ξ	0,11	0,11	0,17	0,20	0,26	0,30	0,35
Предельная влажность $W_{kr}, \%$	300	260	220	210			
Удельный вес $\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	1,65	1,60	1,45	1,40			
Предельная прочность $\tau_k, \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$	0,51	0,55	0,36	0,22			
Модуль деформации $E_k, \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$	2,5	3,0	3,5	5,0			
Предельная относительная деформация λ_k	0,75	0,75	0,74	0,73			
Угол внутреннего трения φ							

ЗАЛЕЖЕЙ И РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Низинная залежь						Рекомендуемые приборы
5-15	15-25	25-35	35-40	40-45	45-60	Полевая центрифуга ЦПС-I
0,11	0,13	0,16	0,14	0,14	0,13	Сдвигомер-крыльчатка СК-8 и универсальный сдвигомер СКК-I
1300	1000	800	700	650	530	Полевой влагомер ВП-I и весы
20,8	16,0	12,4	10,8	9,7	8,0	Уплотнитель УВД-5 и полевой влагомер ВП-I
4,2	4,2	3,5	3,5	3,5	3,0	То же
0,60	0,57	0,85	0,98	1,04	1,21	Винтовой и плоскостной копрессиометры ВК-I и ПК-I и пенетромтр П-4
0,95	0,89	0,77	0,72	0,69	0,64	Стабилометр СТ-I
0,17	0,26	0,40	0,45	0,48	0,52	Стабилометр СТ-I
260	226	200				Полевой влагомер ВП-I
1,60	1,55	1,50				Уплотнитель УВД-5
0,54	0,51	0,40				Сдвигомер-крыльчатка СК-8 и универсальный сдвигомер СКК-I
3,0	3,5	6,0				Компрессиометры ВК-I и ПК-I и одометр
0,73	0,64	0,56				То же
						Пенетромтр с зазубренным конусом и гребенкой СКП-I

С учетом указанных явлений структурно-механические свойства торфяной залежи могут быть оценены по влажности, плотности, степени разложения и кислотности или содержанию обменных катионов в торфе.

В природном состоянии механические свойства залежи в значительной мере обусловлены сохранностью волокнистого каркаса или содержанием в торфе целлюлозы, так как число контактов между всеми фракциями невелико. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают, что в торфе имеются большие неиспользуемые на практике резервы прочности, которые можно привести в действие путем вовлечения в акт разрушения большего числа волокон за счет повышения трения и сцепления структурных элементов.

Наличие в торфе частиц с упруго-вязко-пластическими свойствами существенно отличает его от минеральных грунтов. В процессе уплотнения торфа закономерности отжатия влаги зависят от степени деформирования структурных элементов, шероховатости и активности их поверхности и содержания гидрофильных коллоидов, образующих в системе рыхлую пространственную сетку и колюматирующих водопроводящие поры.

Аномальные свойства фильтрующейся жидкости в торфе вследствие его высокой сжимаемости и снижения размеров водопроводящих пор до 0,2 мк и ниже проявляются при сравнительно низких давлениях (более 0,4 кГ/см²), что служит причиной появления в торфе начального градиента напора влаги.

Результаты трехосных и одноосных испытаний торфа показывают, что, несмотря на наличие во влагонасыщенном торфе заземленного воздуха, соблюдается принцип грунтовой массы Терцаги-Герсевенова и внешняя нагрузка всецело воспринимается поровой влагой. В дренированных испытаниях наблюдается пропорциональное снижение порового давления влаги межчастичного пространства в зависимости от плотности. Поведение влаги внутрисосудистых, агрегатных и внутриклеточных пор зависит от внешней нагрузки и степени деформирования структурных элементов. Линейная связь между прочностью и давлением наблюдается при учете эффективных напряжений.

На специально разработанных сдвиговых приборах рассмотрены специфические особенности испытания торфа на прочность и установлена область применения различных приборов с учетом его степени разложения. Предложены уравне-

ния для определения прочности торфа при заданной нагрузке с учетом влажности и степени разложения.

Разработка и применение комплексной методики и полевых приборов позволили оценить характерные особенности макро-структуры и механические свойства торфяной залежи в естественном залегании, исходя из разделения ее на деятельный, срединный, природный и подстилающий слои. Методами математической статистики и теории вероятности обработаны результаты исследования торфяных месторождений Северо-Западной, Средней и Уральской торфяно-болотных областей и установлены закономерности изменения прочности торфяной залежи ненарушенной структуры в зависимости от физико-химических факторов торфа. Основное влияние на прочность залежи оказывает влажность и степень разложения, с учетом плотности и кислотности, с которыми хорошо коррелируют остальные параметры торфа. Полученные уравнения для определения механических свойств торфа с учетом указанных выше факторов хорошо согласуются с результатами опыта.

Исследования, выполненные по специально разработанной методике и лабораторно-полевыми приборами показали, что в торфе наблюдаются длительно развивающиеся деформации со снижением во времени прочности. Подобные свойства присущи и тонкодисперсным фракциям, но при высокой плотности. В результате экспериментальных исследований показано, что изменение прочности во времени и ползучесть торфа удовлетворительно описываются уравнениями логарифмического типа.

Результаты натурных исследований напряженного состояния и деформируемости торфяной залежи под действием внешних нагрузок и дренирования указывают на сложность протекающих процессов и необходимость применения комплексной методики испытания с использованием современных средств измерения. С соблюдением указанных требований были изучены и установлены закономерности консолидации торфяного основания во времени. Установлено, что интенсивность уплотнения и упрочнения торфяного основания зависит в основном от скорости рассасывания порового давления, которая значительно повышается с применением щелевых песчаных дренажей. На примере исследования ряда натурных объектов показаны характерные особенности и установлены закономерности изменения основных параметров структурно-механических свойств деформируемых торфяных оснований.

В работе получены новые данные о структурно-механиче-

ских свойствах торфяной залежи и установлены закономерности и изменчивость параметров деформируемого торфа, которые могут быть использованы при расчете несущей способности и устойчивости торфяного основания и откосов осушителей, выборе оптимальных условий или темпов нагружения, а также для разработки мероприятий по закреплению и уплотнению торфа.

В результате всестороннего изучения специфических особенностей структуры и механических свойств торфа разработан единый комплекс современных методов и приборов для инженерно-геологических изысканий торфяных месторождений независимо от направленности их использования в народном хозяйстве.

Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:

1. Л. С. Амарян. О физико-механических свойствах малоразложившегося торфа при его прессовании в плиты. «Торф. промышленность», № 1, 1961.
2. Л. С. Амарян. О методике расчета процессов прессования торфяной подстилки в кины и плиты. «Торф. промышленность», № 6, 1962.
3. Л. С. Амарян. О трении и боковом давлении сфагнового торфа. «Труды КТИ», вып. XIII, 1963.
4. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин. К вопросу о переносе влаги в деформируемой торфяной залежи. «Тр. КТИ», вып. XIII, 1963.
5. Л. С. Амарян. Методы и средства исследований органических грунтов. В сб.: «Методы и средства исследования физических свойств твердых тел». ГОСИИТИ, 1964.
6. Л. С. Амарян, Н. В. Чураев. Компрессионно-фильтрационный прибор для работы с радиоактивными изотопами. В кн.: «Применение радиоактивных изотопов и ядерных излучений в промышленности». ГОСИИТИ, 1964.
7. Л. С. Амарян. Исследование виброкомпрессионных свойств торфа. «Изв. вузов, Горный журнал», № 12, 1964.
8. Л. С. Амарян. Компрессионно-фильтрационная консолидация и кинетика изменения напряженного состояния торфяной залежи. «Изв. вузов. Горный журнал», № 1, 1964.
9. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, И. И. Беркович. Зондовый пенетрометр. «Торф. промышленность», № 2, 1964.
10. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, Е. А. Стрекалкин. Устройство для измерения послойной деформации торфяной залежи. Авт. свидетельство № 168259, 1964.
11. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, Г. С. Мешалкин. Многоступенчатый глубинный репер. Авт. свидетельство № 165316, 1964.
12. Л. С. Амарян, И. И. Беркович. Прибор для исследования внешнего трения дисперсных материалов при высоких давлениях на площади контакта. Авт. свидетельство № 167059, 1964.
13. Л. С. Амарян. Применение принципа эффективных напряжений при расчетах уплотнения и сопротивления сдвигу торфа. «Тезисы докладов Всес. конференции по физике торфа НТОЭП», КТИ, Калинин, 1964.
14. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин. Электроосмотическое передвижение влаги в торфе. Там же, Калинин, 1964.
15. Л. С. Амарян. Современные методы и приборы для исследования торфяных грунтов, там же, Калинин, 1964.
16. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, Н. В. Чураев. Исследование структуры деформируемых пористых сред. «Инж.-физич. журнал», № 6, 1965.

17. Л. С. Амарян. Исследование фильтрационной консолидации сильно сжимаемых оснований. В сб.: «Материалы Всес. совещания по стр-ву на слабых водонасыщенных глинистых грунтах». Таллин, 1965.

18. В. Г. Булычев, Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, А. С. Королев. О методике расчета консолидации слабых водонасыщенных грунтов. Там же, Таллин, 1965.

19. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин. Исследование водопроницаемости деформируемого торфа. Известия вузов. Журнал «Строительство и архитектура», № 1, 1965.

20. Л. С. Амарян, И. И. Беркович. Ротационный прибор для исследования внешнего трения дисперсных систем. В кн.: «Теория трения и износа». АН СССР, изд. «Наука», 1965.

21. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин. Исследование напорной и электроосмотической фильтрации воды через торф. «Известия вузов, Горный журнал», № 3, 1965.

22. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, Е. А. Стрекалкин. Индукционная методика для измерения напряжений в грунтах. Авт. свидетельство № 171610, 1965.

23. Л. С. Амарян. Вопросы физико-химической механики при обезвоживании торфа. «Тезисы докл. внутривузовской научно-техн. конф. политехнич. института», Калинин, 1966.

24. В. Г. Булычев, Л. С. Амарян, В. С. Зайцев. Обезвоживание торфомассы в тонких слоях с применением дренирующих полостей. Там же, Калинин, 1966.

25. Л. С. Амарян. Природа прочности торфяных грунтов. Там же, Калинин, 1966.

26. Л. С. Амарян, Е. А. Стрекалкин. Вопросы длительной прочности торфяных грунтов. Там же, Калинин, 1966.

27. Л. С. Амарян. Прочность и напряженное состояние торфяных оснований. «Труды КПИ», вып. 1(14), 1966.

28. Л. С. Амарян. Полевые приборы для определения прочности и плотности слабых грунтов. «Недра», М., 1966.

29. Л. С. Амарян, А. Моркус. Метод расчета устойчивости каналов в торфяных грунтах. «Труды вузов Литовской ССР, Механика», 1, 1966.

30. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, И. И. Лиштван. К изучению механизма набухания торфов низкой степени разложения. «Почвоведение», № 4, 1966.

31. Л. С. Амарян. Комплексное изучение инженерных свойств торфяной залежи. Тр. конференции «Современные пути и методы изучения болот», ВИН АН СССР, Л., 1966.

32. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, А. С. Королев. Процессы уплотнения торфяной залежи при инженерном строительстве. Динамика процесса и метод расчета. Там же, ВИН АН СССР, 1966.

33. Л. С. Амарян. Особенности полевых методов изыскания слабых грунтовых оснований. «Тез. докл. XXIV научн. конф. Ленингр. инж.-строительного института», Ленинград, 1966.

34. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, И. И. Лиштван. Физико-химические превращения в торфяных грунтах при обработке их постоянным электрическим током. В кн.: «Материалы к V совещ. по закрепл. и уплотнению грунтов». Новосибирск, 1966.

35. Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, А. С. Королев. К вопросу электроосмотического уплотнения торфяных грунтов. Там же, Новосибирск, 1966.

36. В. Г. Булычев, Л. С. Амарян, Е. Т. Базин. Полевые исследования деформационных и прочностных свойств торфяных грунтов. «Основ. фундам. и механика грунтов», № 3, 1966.

37. Л. С. Амарян. Сопротивление слабых грунтов сдвигу в естественном залегании. «Основ. фундам. и механика грунтов», № 6, 1966.

38. Л. С. Амарян, В. Д. Соколов, В. А. Исаев, Е. А. Стрекалкин. Исследование эффективности устройства щелевых дренажей для ускорения консолидации торфяных грунтов. «Тезисы докл. XXV научн. конф. ЛИСИ», Ленинград, 1967.

39. Л. С. Амарян. Вопросы механики обезвоживания торфа методом прессования. «Труды КПИ», вып. II, «Недра», 1967.

40. Л. С. Амарян. Динамика фазовых напряжений в торфе при трехосных испытаниях. «Труды КПИ», вып. II, «Недра», 1967.

41. Л. С. Амарян. Прочность торфяных оснований в естественном залегании и методы ее определения. «Транспортное строительство», № 2, 1967.

42. Л. С. Амарян. Физико-химическая природа прочности торфа. «Труды КПИ», вып. II, «Недра», 1967.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на:

1. Международном конгрессе по торфу, Ленинград, 1963.
2. Конференции «Современные пути и методы изучения болот»; ВИН АН СССР, Ленинград, 1964;
3. Всесоюзной конференции по физике торфа, Калинин, 1964.
4. Научной конференции по физико-химической механике дисперсных структур и материалов, АН СССР, Рига, 1965.
5. Всесоюзном совещании по строительству на слабых водонасыщенных глинистых грунтах. Таллин, 1965.
6. Всесоюзном совещании «Теория трения, смазочное действие и новые смазочные материалы», АН СССР, Москва, 1965.
7. Всесоюзном семинаре геологов, Гипроавтотранс, Ленинград, 1965.
8. Калининской научно-технической городской конференции, Калинин, 1965.
9. XXIV научно-технической конференции ЛИСИ, Ленинград, 1966.
10. Внутривузовской научно-технической конференции политехнического института, Калинин, 1966.
11. V совещании по закреплению и уплотнению грунтов, Новосибирск, 1966.
12. XXV научно-технической конференции ЛИСИ, Ленинград, 1967 г.