

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»  
(ТвГТУ)

**О.С. Мисников, О.В. Пухова, Е.Ю. Черткова**

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТОРФЯНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Учебное пособие*

Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
Российской Федерации по образованию в области горного дела  
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся  
по направлению подготовки (специальности) «Горное дело»  
(специализация «Открытые горные работы»)

Тверь 2015

УДК 552.577:53(075.8)  
ББК 26.343.4я7

Рецензенты: директор ООО «Наукоемкое производство» кандидат химических наук Молчанов В.П.; начальник химической лаборатории ЗАО «НИТцентр» кандидат технических наук Левинский В.В.

Мисников, О.С. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие / О.С. Мисников, О.В. Пухова, Е.Ю. Черткова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. 168 с.

Приведены классификации торфа и сапропелей, а также их основные свойства, влияющие на процесс переработки сырья.

Рассматриваются четыре вида переработки торфа и сапропелей. Показаны особенности процесса переработки сырья в зависимости от вида. Рассмотрено технологическое оборудование, используемое на всех стадиях технологического процесса переработки торфа и сапропелей. Приведены схемы и расчеты. Изложены основные подходы при проектировании технологических линий по переработке торфа и сапропелей.

Специальный раздел посвящен комплексной переработке органических отходов торфяного и сапропелевого производств. Приведены сведения по утилизации промышленных отходов от разработки торфяных месторождений и переработки биомассы.

Освещены вопросы рационального использования энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений.

Может быть использовано студентами специальности 130400 Горное дело специализации «Открытые горные работы» в учебном процессе при изучении дисциплины «Физико-химические основы торфяного производства»; магистрантами направления 240100 Химическая технология магистерской программы «Технология переработки торфа и сапропелей» при курсовом и дипломном проектировании, а также специалистами научных и проектных организаций.

ISBN 978-5-7995-0811-1

© Тверской государственный  
технический университет, 2015  
© Мисников О.С., Пухова О.В.,  
Черткова Е.Ю., 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Физико-химические процессы, протекающие при добыче и переработке торфяного сырья, являются основой для повышения эффективности существующих и базой для разработки новых технологий торфяного производства. В настоящее время во всем мире торфяное сырье и продукты его глубокой переработки широко применяются в сельскохозяйственном производстве, энергетическом и коммунально-бытовом секторах промышленности, химической технологии, медицине и охране окружающей среды. Ряд развиваемых в РФ научных направлений позволяет прогнозировать увеличение доли использования продуктов переработки торфа в строительстве, оборонных технологиях и для обеспечения безопасности жизнедеятельности.

Сложность группового химического состава, обусловленная наличием широкого класса соединений в органическом веществе торфа, требует комплексного подхода при освоении торфяных ресурсов. Это является предопределяющим фактором возросшего в последние годы интереса к торфу как сырью для приготовления органических и органоминеральных удобрений; гумифицированному материалу для получения белковых и кормовых продуктов; торфогуминовых и гранулированных удобрений; активных углей и сорбентов широкого спектра действия; модифицированного воска; составов для точного литья; ростовых веществ и биостимуляторов; медицинских препаратов; красителей для древесины; наполнителей, органических вяжущих, стабилизаторов и гидрофобных модификаторов в производстве строительных изделий и при бурении скважин; антислеживателей для широкого класса минеральных дисперсных материалов; разнообразной продукции для сельского хозяйства.

В мировой практике традиционным стало использование торфа в производстве топливных брикетов (РФ, Ирландия, Белоруссия), топлива для электростанций и котельных (РФ, Финляндия, Ирландия, страны Балтии), органических и органоминеральных удобрений (РФ, ЕС). Расширяется спектр научных направлений по применению торфа как сырья для химической переработки. При комплексной переработке наибольший интерес представляют торфяные месторождения верхового типа. Органическое вещество этих месторождений является источником ценных соединений: битумных и гуминовых веществ, углеводов.

Естественные ресурсы торфа требуют взвешенного подхода при организации новых производств на базе подготовленных ранее (до 2000 г.) и вновь осушаемых торфяных месторождений. Использование торфа не может быть единообразным, а должно оцениваться условиями залегания массива, его природными особенностями, составом и свойствами сырья. В этой связи изучение физико-химических процессов торфяного производ-

ства позволяет составить целостное представление о торфе и продуктах его переработки. В исследованиях М.П. Воларовича, Н.В. Чураева, И.И. Лиштвана, Н.И. Гамаюнова, А.Е. Афанасьева и других известных ученых показано, что основными кинетическими единицами торфа являются проницаемые для молекул воды и ионов агрегаты макромолекул. Прочность структуры торфа определяется соотношением продуктов биохимического распада – гуминовых веществ, оцениваемых по степени разложения, – и неразложившейся (слаборазложившейся) части растений-торфообразователей. Контактные взаимодействия между агрегатами и внутри них возникают главным образом за счет ван-дер-ваальсовых и водородных связей. В торфе также различаются макро- и микроструктуры. По мере десорбции влаги прочность структуры торфа увеличивается и материал из вязкопластичного состояния переходит в упругохрупкое с открытой пористостью.

Содержание неорганических компонентов в торфе, оцениваемое по его зольности, может достигать 50 % на сухое вещество. Влажность и зольность торфа – важные характеристики, которые используются для оценки его качественных показателей. В настоящем учебном пособии вода и сухое вещество торфа, его неорганическая часть и зольность рассмотрены в тесной связи с генезисом и особенностями технологии торфяного производства. Большое внимание уделено методам определения влажности и зольности торфа.

Кислотность торфа анализируется как диагностический показатель его типовой принадлежности и как одна из агрохимических характеристик исходного сырья и готовой продукции. Важным следует признать анализ основных факторов, определяющих кислотность и окислительно-восстановительный потенциал торфа.

Накопление органического вещества в земной коре является важнейшим (начальным) этапом синтеза всех видов твердых топлив. Торфяная залежь в целом, и торф в частности, относятся к природным объектам, позволяющим получать данные об основах эволюции растительных организмов. По сути, это материал для изучения законов генезиса, строения и использования твердых органогенных отложений и основа для широких исследований в области физикохимии твердых топлив как гумусовой, так и сапропелевой природы.

Работа подготовлена на кафедре «Геотехнология и торфяное производство» Тверского государственного технического университета.

Материал, представленный в издании, базируется на работах ученых и специалистов, занимавшихся проблемами физикохимии торфа, а также результатах НИР авторов учебного пособия. В учебном пособии в основном использовались результаты работ Л.С. Амаряна, В.Я. Антонова, Е.Т. Базина, А.А. Головича, И.И. Лиштвана, С.А. Сидякина, В.И. Суворова, А.А. Терентьева.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

## 1.1. Генезис торфа.

### Общие представления о составе и свойствах торфяного сырья

В природе отложения органического вещества находятся в мало-, средне- и высококонцентрированном состояниях, которые определяются соотношением в них органических соединений и минеральных компонентов. Малоконцентрированные скопления органических соединений называют рассеянным углеродом. Среднеконцентрированное скопление их в пластах земли представляет углерод почвы – гумус. Высококонцентрированные скопления органических веществ относят к горючим ископаемым (топливам), они могут служить источником тепловой энергии. Содержание органического вещества в горючих ископаемых колеблется от 20 до 98–100 % [1].

Горючие ископаемые по агрегатному состоянию подразделяются на твердые, жидкие и газообразные. Торф относится к твердым природным горючим ископаемым. Отличительной особенностью его является высокая насыщенность влагой. В торфе на одну часть сухого вещества приходится до 20 и более частей воды. В качестве топлива торф используется после частичного удаления влаги в результате осушения торфяных залежей, искусственного обезвоживания, естественной или искусственной сушки. Разные виды торфяного топлива предусматривают также определенные схемы его переработки. Качество твердого топлива может повышаться брикетированием, обогащением, пылеприготовлением. Все разнообразие природных и искусственных топлив представлено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Виды топлива

Агрегативное состояние топлива	Естественное	Искусственное
Газообразное	Природный газ	Газы промышленной переработки нефти и твердых горючих ископаемых
Жидкое	Нефть	Продукты переработки нефтей, углей, сланцев, торфа
Твердое	Торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, горючие сланцы	Полукоксы, коксы, брикеты

Еще в XIX в. было известно о промышленной добыче торфа и использовании его как твердого горючего ископаемого. Развитие научных исследований в этом направлении заложило основы торфяной отрасли народного хозяйства. Были заложены физические основы новых технологических процессов торфяного производства, созданы высокопроизводительные машины и агрегаты, а также повышена эффективность использования торфа в сельском хозяйстве и как сырья для комплексной переработки с целью получения новых материалов на основе термобioхимического синтеза.

Большая часть (64,4 %) добываемого торфа используется для производства тепла и электроэнергии [2]. Максимальное количество торфа добывается в Финляндии (21,8 %), Ирландии (15 %), Белоруссия (14,6 %), Швеции (11,4 %).

Все виды горючих ископаемых сосредоточены в осадочных породах земной коры, изучение которой является непосредственной задачей геологии – науки о Земле, ее строении, происхождении и развитии. Различные горючие ископаемые в земной коре находятся в следующем соотношении: угли и сланцы – 95,8 %, торф – 3,4 %, нефть – 0,7 %, природный газ – 0,1 %. Земная кора, или литосфера, состоит из различных горных пород – гранитов, гнейсов, базальтов и др. Верхние слои земной коры представлены осадочными породами – глинами, суглинками, песками, известняками, почвой.

В истории земного шара выделяют четыре геологические эры, которые подразделяются на периоды, периоды – на эпохи, эпохи – на века. Накопление запасов угля протекало неравномерно в различные эры и периоды. Однако можно отметить, что возраст углей измеряется десятками и сотнями миллионов лет.

Торф – самое молодое в геологическом отношении твердое горючее ископаемое. Его возраст измеряется тысячелетиями. В естественном состоянии прирост торфа составляет 1 мм в год. Размер площади, занимаемой торфяными месторождениями и болотами, составляет около 350 млн га, причем около 100 млн га имеют промышленное значение. На территории Западной Европы расположено 51 млн га, Азии – свыше 100 млн га, Северной Америки – свыше 18 млн га [2]. Общая площадь торфяных месторождений СССР составляет около 71,5 млн га, из разведанных – 47,3 млн га [2–4].

Биолиты – это все встречающиеся в земной коре породы, образование которых связано с глубокими превращениями остатков растений и животных. В зависимости от конечного результата превращений биолиты могут быть горючими (каустобиолиты) и негорючими (акаустобиолиты).

С древнейших времен человечество интересовалось происхождением твердых топлив. Основоположником современной растительной трансформационной теории о происхождении угля можно считать М.В. Ломо-

носова. В настоящее время растительное происхождение твердых горючих ископаемых признается большинством ученых [1, 3, 4].

Изучение генезиса твердых горючих ископаемых показало, что в их образовании принимали участие представители крупных растений с мощными побегами и простейшие представители живого мира. Растительность постоянно видоизменялась, но весьма медленно, обычно без внезапного вымирания видов. Чем древнее, чем отдаленнее от нас рассматриваемая эпоха, тем проще организованы ее представители [1].

В третичном, а затем в четвертичном периодах кайнозойской эры развивались растения, приближающиеся к современным видам. Сфагновые мхи – одни из торфообразователей – появились лишь в четвертичном периоде. Состав и свойства других растительных ассоциаций, продуцирующих торф, мало чем отличаются от современных растительных сообществ [6]. Для понимания процессов торфообразования необходимо знать химический состав отдельных частей растений.

Растения состоят из липидов (жиров, восков, смол), углеводов (простейших углеводов, целлюлозы, пектиновых веществ, гемицеллюлоз), лигнина, белков в разных соотношениях.

Различные по природе растения имеют неодинаковый химический состав. У высокоорганизованных растений главными составными частями являются целлюлоза и лигнин. Содержание липидов во мхах достигает 10 %, а в водорослях – 20–30 %. Состав исходного органического вещества растительного происхождения [3, 4], представлен в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Состав исходного органического вещества растительного происхождения, % на сухое вещество

Органический материал	Липиды	Углеводы	Лигнин	Белки
Водоросли	20–30	25–50	0	20–30
Мхи	8–10	30–40	10	15–20
Деревья	1–5	50–75	20–30	1–7
Травы	5–10	50	35–40	5–10
Древесина	2–3	60	20–30	1
Протоплазма	10	20	0	10

Лигнин входит в состав высокоразвитых наземных растений. Водоросли и мхи, как правило, его не содержат. Все растительные организмы включают в свой состав белковые вещества. Отличительная особенность липидов – высокое содержание в них водорода, для углеводов характерно большое количество кислорода, азот присутствует в белках.

В образовании органического вещества твердых горючих ископаемых участвуют все индивидуальные соединения растений. Согласно [1] «все твердые горючие ископаемые есть результат превращения различных растительных остатков – как наземных, так и водяных». В познании генезиса твердых топлив особое место отводится торфяной стадии [1, 7]. Торф образуется в процессе естественного отмирания и неполного распада болотных растений в условиях избыточного увлажнения и затрудненного доступа воздуха. В таких условиях они разлагаются не полностью, как в почве, а только частично, остатки их из года в год накапливаются. Интенсивность накопления избыточной влаги и развитие торфообразовательного процесса зависят от климатических, геологических, гидрогеологических и геоморфологических условий. Болота интенсивно развиваются при избыточном увлажнении, а специфические особенности зависят от окружающей температуры и относительной влажности воздуха, строения коренных пород и уровня стояния грунтовых вод, рельефа поверхности и минерального режима питающей среды, растительного покрова.

На соответствующем минеральном грунте в начале процесса торфообразования развиваются растения-торфообразователи, а затем по мере накопления торфа они растут на органоминеральном субстрате, что приводит к смене растительных ассоциаций. Поэтому в группировках торфообразователей наблюдается закономерность: отдельные слои торфа включают остатки нескольких торфообразователей, вследствие чего торф по ботаническому составу разнороден. В свою очередь растения-торфообразователи отличаются друг от друга по химическому составу, что придает определенные свойства различным видам торфа и обуславливает их неоднородность.

При выяснении природы твердых горючих ископаемых важнейшей проблемой является установление роли отдельных соединений исходных растений в процессах образования составных частей топлива. Наибольший интерес представляют гуминовые соединения. Существуют различные точки зрения на синтез гуминовых веществ. В одних работах эти соединения рассматриваются как продукты превращения лигнина, фенолов, целлюлозы, гемицеллюлозы, в других особая роль в их образовании отводится уроновым кислотам, синтезирующимся в ассимилирующих органах растений и накапливающимся в форме пектиновых веществ и полиуронидных гемицеллюлоз [1].

Уроновые кислоты можно рассматривать как структурные единицы, участвующие в построении гуминовых кислот и фульвокислот. Некоторые авторы отмечают, что гуминовые кислоты могут синтезироваться из любого исходного органического вещества растений, стремящегося преобразовать свою структуру в более устойчивую к бактериальным и окислитель-



ным воздействиям – гумусовую [1]. Другие исследователи решающую роль в образовании гуминовых веществ отводит углеводам [8].

Материальный баланс торфообразовательного процесса показывает, что циклические соединения, или протогумины, образуясь, так же как и другие производные фенолов, из сахаров под действием ферментов растения, синтезируются в основном в живом растении. Последующие их изменения в торфе возможны с участием микроорганизмов или за счет дегидратирующих ферментов растений с образованием мономеров ароматических соединений, дальнейшая конденсация которых приводит к появлению макромолекул гуминовых кислот. В растениях-торфообразователях находятся не собственно гуминовые кислоты, а их предшественники, которые по элементному составу и количеству периферийных групп похожи на гуминовые кислоты торфа. Целлюлоза не принимает прямого участия в образовании гуминовых веществ, а служит питательной средой для микроорганизмов.

На интенсивность процесса разложения органического вещества влияют многие факторы, среди которых большое значение имеет природа растений. Интенсивно разлагается пушица, в ней за шесть месяцев теряется 67–72 % сухого вещества. За этот же период сфагновый мох теряет только 4 % сухого вещества, что связано с содержанием в этих растениях фенолов-антисептиков. Частичное удаление водорастворимых фенолов в два раза ускоряет процесс разложения. Добавление кальция также способствует разложению сфагнового мха. При этом потери сухого вещества увеличиваются до 16 %, что связано с образованием труднорастворимых солей антисептиков и повышением жизнедеятельности микроорганизмов при нейтрализации кислотности.

В процессе аэробного разложения растений в торфогенном слое существенно меняется их химический состав. Уменьшается содержание углеводного комплекса, а количество гуминовых веществ и негидролизуемого остатка практически не изменяется по сравнению с их содержанием в отмершем растении. Роль микроорганизмов в данном случае сводится не к направленному образованию гуминовых веществ, а скорее к завершению синтеза. Со структурными единицами гуминовых кислот прочно связывается некоторая часть азотсодержащих соединений.

Формирование веществ, составляющих торф, проходит в торфогенном слое с участием микроорганизмов. Согласно [7, 8] «болотные растения, будучи отрезаны от минерального грунта гумусом и синтезируя регуляторы роста (стимуляторы в весенний период и ингибиторы в период плодоношения), поддерживают оптимальную концентрацию последних путем вывода из раствора их избытка. Выведение из раствора осуществляется путем превращения их в нерастворимое состояние, а это обеспечивает образование водонерастворимых комплексов с аминокислотами и белками. С соответствующими изменениями они дают гумус». В анаэробных усло-

виях компоненты торфа мало изменяются, а подземные органы растений консервируются, образуя структурную волокнистую часть торфа.

Погребенный торф отложился в период между оледенениями или оказался перекрытым рыхлыми отложениями разной мощности в результате изменения характера эрозии. Возраст погребенного торфа исчисляется десятками тысячелетий, он имеет меньшую влажность в сравнении с современным торфом и более высокую плотность [1, 2].

В генезисе торфа можно выделить ряд факторов и процессов.

1. Накопление органического вещества в торфе происходит в торфяном слое и зависит от биохимической устойчивости растений и условий их распада (кислотности, химического состава среды и др.).

2. Химический состав торфа определяется видом растений-торфообразователей, а в узких ботанических границах зависит от степени разложения. Минеральные компоненты могут в значительной степени изменить свойства торфа. В отдельных случаях фракции торфа различного ботанического состава одного и того же месторождения могут быть более похожи друг на друга, чем образцы одинакового состава разных месторождений.

3. При микробиологическом распаде сахаров одновременно с циклизацией происходит их минерализация.

4. Химический состав азотсодержащих соединений изменяется в направлении уменьшения количества аминокислот и увеличения гетероциклических соединений, входящих в высокополимерную часть.

5. При формировании растительности болот регулирующим фактором является химический состав вод (ионы  $\text{Ca}^{2+}$  подавляют развитие сфагновых мхов,  $\text{P}_2\text{O}_5$  стимулирует развитие пушицы, с сульфатами связано появление тростника). Среда верховых болот характеризуется общей минерализацией 35–75 мг/л, контактных зон – 70–180 мг/л, а низинных болот – более 190 мг/л [3]. Установлено влияние химического состава воды на растительные группировки торфяных месторождений в зависимости от географической зональности [9].

6. При генетической связи протогуминов растений с гуминовыми веществами торфа между ними имеются и принципиальные различия: в гуминовых кислотах торфа появляется гетероциклический азот, практически отсутствующий в протогуминах растений.

Таким образом, на процесс превращения растительного материала в торф влияют многие факторы, среди которых особая роль принадлежит химическому составу болотных вод. Уровень биохимического распада и условия торфообразования определяют основные свойства торфа.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое гумус?
2. Перечислите виды топлив.

3. Что такое торф?
4. Что такое биолиты?
5. Кто является основоположником современной трансформационной теории о происхождении угля?
6. Из каких веществ состоят растения?
7. Какие факторы влияют на торфообразование?
8. Как происходит процесс разложения торфа?
9. Что такое генезис торфа?

## 1.2. Общие представления о торфе

Торф – сложное природное образование, многокомпонентная коллоидно-высокомолекулярная система, различные соединения которой придают ей признаки полиэлектролитов и микромозаичной гетерогенности.

Многообразие свойств торфа обусловлено исходным материалом (им являются растения-торфообразователи) и широким диапазоном условий торфонакопления. По внешнему виду торф в естественном состоянии представляет более или менее однородную по составу и окраске массу черного или темно-коричневого цвета различных оттенков.

В торфе выделяют твердое (сухое) вещество, жидкую и газообразную фазы. Твердое вещество состоит из неполностью разложившихся растительных остатков, продуктов разложения растительных тканей в виде потерявшего клеточную структуру темного аморфного вещества (гумуса) и минеральных веществ, остающихся после сгорания торфа в виде золы. В естественном состоянии торф обычно содержит 85–95 % воды, а в сухой части – до 50 % минеральных соединений.

Органическое вещество торфа состоит из углерода, водорода, кислорода, серы и азота. Для торфа в целом содержание указанных элементов находится в пределах 48–65 % С; 4,7–7,3 % Н; 0,02–1,2 % S; 0,5–4 % N; 24,7–45,2 % О (см. прил. 1, [1]).

Элементный состав отражает характер изменений органического вещества при торфообразовании и природу исходного растительного материала. Содержание остатков каждого из растений в волокнистой, отмытой от гуминовых веществ части торфа определяет его ботанический состав.

По ботаническому составу устанавливают соответствующее ему название вида торфа. Вид торфа – первичная таксономическая единица, отражающая исходную группировку растительности, а также в некоторой степени свойства торфа. Всего в настоящее время выделяют 20 видов низинного, 8 видов переходного и 12 видов верхового торфа (см. прил. 3). В условиях преимущественно атмосферного олиготрофного (бедного) питания преобладают растения верхового типа. В условиях евтрофного (богатого), преимущественно грунтового питания формируется растительность низинного типа. Торф, отлагаемый в основном (не менее 95 % остатков рас-

тений-торфообразователей олиготрофного типа) верховой растительностью, называется верховым, низинной (не менее 95 % остатков евтрофных растений) – низинным. К переходному типу относятся торфа, в составе которых 10–90 % остатков растений олиготрофного типа, а остальная часть – остатки растений евтрофного типа, и торфа, состоящие полностью из остатков сфагновых мхов мезотрофного типа.

Универсальной характеристикой торфа, отражающей уровень биохимического распада растений-торфообразователей, является степень разложения  $R$ , показывающая содержание в торфе бесструктурного вещества, утратившего клеточное строение. Известно, что при одинаковом ботаническом составе торфа многие его свойства в значительной мере зависят от степени разложения. При равной степени разложения, но различном ботаническом составе торф может также значительно отличаться по свойствам, в связи с чем степени разложения и ботанического состава были приняты в качестве универсальных показателей для оценки свойств торфа. Степень разложения (которая может изменяться от 1 до 70 %) показывает содержание в торфе аморфного вещества, состоящего из продуктов разложения исходной растительной массы и мельчайших обрывков ее тканей, утративших клеточную структуру (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Классификация торфа по степени разложения

Тип	$R$ , %	Класс
Низинный	0–15	1
	16–34	2
	35	3
Переходный, верховой	0–20	1
	21–34	2
	35	3

Степень разложения используется для определения различных параметров технологического процесса добычи и переработки торфа. Она косвенно входит в важнейшие формулы определения выхода сухого торфа из единицы объема залежи и сбора торфа с единицы площади, так как по ней с учетом ботанического состава (типа торфа) определяют объемный вес по таблицам [37]. По величине степени разложения и ботаническому составу отличают топливный торф от подстилочного, судят о возможных выходах химических продуктов и т. д. При разведке торфяных месторождений о свойствах торфа также судят по ботаническому составу и степени разложения.

Анализ ботанического состава является важной характеристикой торфа, которая необходима не только для выявления стратиграфии торфяной залежи, но и для определения ряда ее технических свойств (тепло- и звукопроводность, склонность к крошимости, засоренность грубыми волокнами пушицы, влагоемкость, пористость и др.).

В зависимости от ботанического состава и кислотности торф делится на три типа: низинный, переходный, верховой (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Деление торфа по типам

Содержание торфообразователей	pH	Тип
Низинные: $\geq 95$ % от общего количества	4,8	Низинный
Верховые и низинные: $> 5$ % от общего количества	4,8–3,6	Переходный
Верховые: $\geq 95$ % от общего количества	3,6	Верховой

Среднестатистическая характеристика ботанического состава основных видов торфа приведена в табл. 1.5.

Широкая амплитуда допустимых колебаний содержания остатков растений различных групп для видов торфа приводит к значительной вариабельности их ботанического состава. Это является одной из причин большой изменчивости свойств отдельных видов торфа ботанической классификации.

Основными группами органических соединений торфа являются битумы, водорастворимые и легкогидролизуемые гуминовые вещества, целлюлоза, негидролизуемый остаток (см. прил. 2). Разные виды торфа дают различный выход этих соединений. Так, битумы в верховом торфе могут составлять 1,2–17,7 %, содержание водорастворимых и легкогидролизуемых веществ находится в пределах 7–63 % и резко уменьшается с повышением степени разложения.

Наиболее биохимически неустойчивым соединением является целлюлоза, содержание которой в низинном торфе доходит до 9 %, а в верховом – до 21 %. Содержание гуминовых кислот в торфе растет при увеличении степени разложения и колеблется в пределах 5–55 %. Из растений-торфообразователей в торф переходит лигнин и вещества лигноподобной структуры (кутин, суберин). Их содержание доходит до 20 %.

Таблица 1.5

## Ботанический состав основных видов торфа

Вид торфа	Содержание остатков растений, %					
	древесных		травяных		моховых	
	Средне-статистическое	Допустимые пределы	Средне-статистическое	Допустимые пределы	Средне-статистическое	Допустимые пределы
Торф верхового типа						
Сосновый	56	40–100	23	0–60	21	0–60
Сосново-пушицевый	24	15–35	58	35–85	18	0–30
Сосново-сфагновый	26	15–35	23	0–30	51	35–85
Пушицевый	5	0–10	66	60–100	29	0–30
Шейхцериевый	8	0–10	69	60–100	23	0–30
Пушицево-сфагновый	4	0–10	45	25–65	51	30–70
Шейхцерииво-сфагновый	10	0–10	37	25–65	53	
Фускум-торф	2	0–10	8	0–30	90	35–65
Медиум-торф	3	0–10	10	0–30	87	70–100
Комплексный	4	0–10	14	0–30	82	70–100
Сфагновый мочажинный	4	0–10	11	0–30	85	70–100
По типу	9	–	25	–	66	–
Торф низинного типа						
Древесный	60	40–100	35	0–60	5	0–60
Ольховый	56	40–100	40	0–60	4	0–60
Березовый	58	40–100	41	0–60	1	0–60
Сосновый	72	40–100	23	0–60	5	0–60
Древесно-осоковый	24	15–35	72	35–85	4	0–30
Древесно-тростниковый	28	15–35	71	35–85	1	0–30
Тростниковый	8	0–10	88	60–100	4	0–30
Осоковый	4	0–10	87	60–100	9	0–30
Шейхцериевый	7	0–10	88	60–100	5	0–30
Осоково-гипновый	2	0–10	62	25–65	36	35–65
Осоково-сфагновый	3	0–10	56	25–65	41	35–65
Гипновый	1	0–10	25	0–30	74	70–100
Сфагновый	1	0–10	21	0–30	78	70–100
По типу	21	–	60	–	19	–

По содержанию минеральных элементов, оцениваемых зольностью, виды торфа значительно различаются. Так, низинный торф имеет зольность 6–18 %, переходный – 4–6 %, верховой – 2–5 %.

Зольность – один из основных показателей, определяющих пригодность торфа для различных направлений использования. Содержание минеральных веществ в торфе колеблется в широких пределах. В зависимости от степени минерализации питающих вод определяется и амплитуда зольности отложившегося в этих условиях торфа.

Для торфа низинного типа наиболее характерны показатели зольности 6–18 %, переходного – 4–6 % и верхового – 2–4 %. Под зольностью понимается выраженное в процентах отношение массы золы, содержащейся в торфе, к массе всего торфа. Зола – это остаток, образовавшийся при полном сгорании торфа.

Сильноминерализованный торф образуется обычно в результате вторичного зазольнения. Высокозольные залежи торфа известны для всех трех типов. Однако в основном они представлены торфом низинного типа и образуются в условиях обильного поступления на торфяное месторождение минеральных веществ с окружающих суходолов (пески, глины), либо с подземными водами, обогащенными солями кальция, железа, фосфора или серы. В этих условиях могут формироваться песчанистые, глинистые, известковистые, охристые, вивианитовые или сернистые торфяные отложения.

Зольность в размере 50 % (на сухое вещество) условно принято считать границей между понятиями «торф» и «зоторфованный грунт».

По зольности различают 6 подгрупп торфа:  $A^c \leq 5 \%$ ;  $A^c = 5,1–10 \%$ ;  $A^c = 10,1–15 \%$ ;  $A^c = 15,1–23 \%$ ;  $A^c = 23,1–35 \%$ ;  $A^c = 35,1–50 \%$ .

В соответствии с источниками накопления различают первичную (или конституционную) золу, количество которой соответствует зольности растений-торфообразователей, и вторичную золу, наличие которой определяется поступающими извне минеральными частицами.

Торф, имеющий первичную зольность, называют также нормальнозольным. 15 % зольности является верхней границей нормальнозольного торфа в промышленной классификации торфяного сырья, что также связано с условиями нарушения связей между свойствами торфа при более высокой зольности.

Зольность торфа определяют по процентному отношению остатка, образующегося при прокаливании, к общему весу образца. Остаток после прокалывания не всегда соответствует содержанию в торфе минеральных веществ. При прокаливании протекают процессы, сопровождающиеся изменением количества минеральных веществ, содержащихся в торфе, в ту или другую сторону. К этим процессам относятся потеря гидратной влаги силикатами, разложение карбонатов с выделением  $CO_2$ , образование

сульфатов и переход закисного железа в окисное, сопровождающиеся присоединением кислорода.

Диагностическая характеристика торфа – кислотность (рН), играющая большую роль в формировании свойств торфа.

Под термином «кислотность» подразумевается реакция водной среды торфа, которая определяется активностью ионов водорода ( $H^+$ ) и численно равна отрицательному десятичному логарифму из активности  $H^+$ . Показатель рН меньше 7 означает кислую реакцию среды, при рН, равном 7, реакция нейтральная и при рН больше 7 – щелочная.

Кислотность обусловлена наличием свободных кислот (уксусной, муравьиной, щавелевой, молочной и др.). Чем больше в торфе свободных кислот, тем выше его кислотность. В верховых торфах свободных кислот больше, чем в низинных, у которых кислотность меньше. Большое содержание катионов в этих торфах способствует образованию солей (гуматов и др.).

Кислотность важна при изучении природных особенностей торфа, его генезиса, является одним из факторов интенсивности микробиологической деятельности, роль которой в торфообразовательном процессе общеизвестна. Повышенная кислотность отрицательно воздействует на сельскохозяйственные растения, культивируемые на торфяниках или полях, удобренных торфом. Кислотность при использовании торфа на подстилку определяет антисептические свойства последней. По кислотности можно судить о степени насыщенности поглощающего комплекса торфа кальцием. Она более точно, чем ботаническая характеристика, определяет тип низинного и переходного торфа.

В торфе, как и в почвах, различают активную и потенциальную кислотность [1].

Активная кислотность торфа характеризуется активностью водородных ионов в торфяном растворе или водной вытяжке из торфа и является следствием частичной диссоциации его компонентов. Активная кислотность обусловлена присутствием в торфяных растворах  $H_2CO_3$ , кислых и гидролитически кислых солей, а также частично растворимых органических гуминовых веществ торфа. Активную кислотность определяют по величине рН в водной вытяжке из торфа колориметрическим или электрометрическим методом.

Потенциальная кислотность измеряется количеством ионов водорода и алюминия, находящихся в поглощающем комплексе торфа в скрытом, поглощенном состоянии, включает в себя обменную и гидролитическую кислотность.

Обменная кислотность представлена более подвижной частью ионов водорода и алюминия торфа, которая может быть переведена в раствор при обработке торфа избытком нейтральной соли хлористого калия. Остальная, менее подвижная часть ионов водорода и алюминия, которая переходит в



раствор при дальнейшей обработке торфа солями, дающими в водном растворе в результате гидролиза щелочную реакцию, называется гидролитической кислотностью.

Наибольшее практическое значение имеет обменная кислотность, или, как ее еще называют, кислотность солевой вытяжки торфа. В практике геологоразведочных работ ее используют в качестве дополнительного диагностического показателя при оценке свойств торфа. Обменная кислотность имеет заметные связи с минеральной частью торфа, главным образом с соединениями кальция.

Прямая связь обменной кислотности с соединениями кальция устойчива и характерна для торфа, она не зависит от типа и географического расположения торфяных месторождений. Однако эта связь может меняться от слабой до очень сильной, что указывает на влияние других факторов. Значительное изменение кислотности может быть следствием повышенного содержания таких компонентов минеральной части торфа, как железо, сера, алюминий. Кальций может вызвать значительно большие изменения рН, чем остальные факторы, вместе взятые [1]. Это позволяет считать кальций главным регулятором кислотности торфа.

По мере нарастания насыщенности торфа кальцием уменьшается его кислотность (возрастает рН). Степень насыщенности поглощающего комплекса торфа кальцием характеризует тип торфа, но не вид. Насыщенность кальцием как основной фактор изменения кислотности может служить надежным признаком типовой принадлежности торфа. Эта особенность отмечается в работе [1], где указывается, что с увеличением содержания кальция в торфе растет и рН.

При увеличении содержания кальция до 1,5 % рН возрастает от 3,2–3,4 до 4,4. При содержании кальция 2–5 % рН находится в пределах 4,8–5,8, то есть мало изменяется. При увеличении содержания СаО выше 5,8 % рН снова резко возрастает. Ее нижний предел повышается до 6,2, а верхний вплотную приближается к 7,6. Нарастание рН торфа при увеличении содержания в нем СаО свыше 6 % происходит крайне медленно, а при 10 % практически прекращается. Резкое изменение рН при увеличении содержания кальция в торфе от 5 до 6 % следует объяснить тем, что именно в этом интервале он частично присутствует в торфе в виде минеральных соединений. При меньшем содержании кальций полностью связан с органическими соединениями.

Из связей кислотности с органической частью торфа выделяется связь с содержанием битумов. Более четко она выражена у торфа низинного типа, где обратная зависимость между показателем рН и содержанием битумов получена для большинства видов и для типа в целом. В торфе верхового типа эта зависимость маскируется влиянием степени разложения.

Показатель рН солевой вытяжки торфа колеблется в пределах 2,6–7,4. В торфе верхового типа кислотность имеет колебания от 2,6 до 5,8. Однако величина кислотности более 3,6 встречается редко и не является характерной для торфа верхового типа. В среднем по видам торфа верхового типа показатель кислотности увеличивается от торфа моховой группы (3,1–3,2 рН) к травяным и древесным, достигая максимальной величины у шейхцериевого верхового торфа (3,7 рН). В торфе переходного типа кислотность изменяется в пределах 2,8–5,9 рН. В среднем по видам торфа шейхцериевый переходный торф имеет минимальную величину рН (3,9), а гипновый переходный – максимальную (4,7). В торфе низинного типа рН отдельных образцов изменяется от 2,8 до 7,4. Кислотность (средняя) отдельных видов торфа низинного типа колеблется от 4,4 рН у хвощевого до 5,8 рН у древесного торфа.

Показатель рН хлоркаалиевой вытяжки отражает взаимосвязь минеральных компонентов, влияющих на свойства торфа, и может служить диагностическим признаком при разделении залежи на типы, а также использоваться для приближенной оценки содержания в торфе соединений кальция.

Для торфа в естественном состоянии характерна высокая водонасыщенность (до 20 и более частей воды на одну часть сухого вещества). Наиболее часто в технических расчетах пользуются значением влажности торфа. Меньшей влажностью обладает торф древесной группы, большей – моховой. После частичного или полного обезвоживания торф способен вновь поглощать влагу. Это свойство торфа как капиллярно-пористого тела оценивается водопоглощаемостью и является важным при использовании торфа в качестве подстилки, удобрения, а также мелиоранта минеральных почв легкого состава. Водопоглощаемость низинного фрезерного торфа при влажности  $40 \pm 5$  % изменяется в пределах 70–800 %, переходного – 120–900 % и верхового – 75–2 000 % [1, 10].

Для оценки водных свойств торфа используют полную влагоемкость, то есть способность удерживать торфом влагу под влиянием молекулярных, капиллярных и других связей. Это понятие применимо к торфу в залежи или к торфу-сырцу при максимальном его насыщении водой в условиях свободной фильтрации и при полном отсутствии испарения.

По теплоте сгорания торф в ряду горючих ископаемых занимает место между бурными углями и дровами. Тепловая ценность торфа как топлива незначительно повышается с ростом степени разложения и в большей степени зависит от влажности, поэтому брикеты имеют наибольшую теплоту сгорания, а фрезерный торф – наименьшую. Кусковой торф занимает промежуточное положение.

Плотность и пористость – основные физические характеристики торфа, определяющие состояние материала и его поведение в технологических процессах торфяного производства. Применительно к фрезерному

торфу пользуются показателем насыпной плотности, среднее ее значение составляет у торфа низинного типа –  $287 \text{ кг/м}^3$ , переходного –  $279 \text{ кг/м}^3$ , верхового –  $297 \text{ кг/м}^3$  [1]. Непосредственно структуру торфа характеризуют пористость и дисперсность. К основным характеристикам пористой структуры относятся общая пористость, размеры пор, кинетическая удельная поверхность, активная пористость, содержание неподвижной воды. Пористостью и плотностью определяется такая величина, как прочность.

Торф – упругопластичновязкое тело, при деформировании подчиняется основным законам реологии. Реология торфа рассматривает процессы, связанные с текучестью, пластичностью и упругостью торфяных систем. В зависимости от влагосодержания торфяные системы могут быть жидкообразными структурированными и твердообразными условнопластичными с преобладанием коагуляционных структур, или структур переплетения. Реологическое поведение торфа оценивается уравнением Шведова – Бингама. Основными реологическими характеристиками торфа являются пластическая вязкость, предельное напряжение сдвига, модули деформаций, периоды релаксации напряжений и др. Реологические свойства торфа широко используются при расчетах процессов течения, формирования и сушки торфа. Процессы искусственного обезвоживания торфа, прочность и деформируемость торфяных залежей как оснований инженерных сооружений, уплотнение торфа при производстве различных видов продукции обычно оценивают на основе компрессионных и прочностных свойств. Прочностные свойства торфа и торфяных залежей характеризуются сопротивлением сдвигу по методу вращательного среза, сопротивлением пенетрации, а также углом внутреннего трения. На практике часто применяют основные закономерности внешнего трения и прилипания торфа.

Для расчета переноса тепла и влаги при сушке торфа используются показатели тепло-, влаго-, температуро-, термовлагопроводности, удельной теплоемкости.

Электрофизические свойства торфа, включая и электрокинетические явления, представляют интерес для влагометрии и процессов структурообразования в торфяных системах.

Многообразие признаков состава и свойств торфа и готовой продукции включает шесть основных групп:

1) общетехнические свойства (ботанический состав, степень разложения, зольность, влажность, теплота сгорания);

2) физико-технические свойства (плотность торфа и готовой продукции, влажность, водопоглощаемость, полная влагоемкость, прочность, фракционный состав, засоренность посторонними горючими включениями, крошимость);

3) химические свойства (элементный состав, групповой состав);

4) агрохимические свойства (кислотность, химический состав неорганической части, в том числе валовые и подвижные формы элементов питания, характеристики поглощающего комплекса);

5) физические и физико-химические свойства (дисперсность, катионный состав и показатели ионообменных процессов, содержание различных категорий воды, теплофизические и электрофизические характеристики);

6) физико-механические свойства (пористость, реологические свойства, прочность и несущая способность торфяных залежей, внешнее и внутреннее трение).

### **Контрольные вопросы**

1. Что является причиной многообразия свойств торфа?
2. Какие фазы выделяют в торфе?
3. Из чего состоит органическое вещество торфа?
4. Что является первичной таксонометрической единицей торфа?
5. Что такое степень разложения?
6. Для оценки каких свойств используется полная влагоемкость?
7. Перечислите основные группы свойств торфа.
8. Зачем необходимо знать значение кислотности торфа?

### **1.3. Характеристика мировых запасов торфяного сырья**

Торфяные месторождения по земному шару распределены неравномерно в соответствии с почвенно-ботаническими зонами. Мировые запасы торфа оцениваются в 285,4 млрд. т. Из континентов наиболее богаты торфом Азия (около 50 %), Европа (31 %), Северная Америка (11 %). Имеются торфяные месторождения в Африке, Южной Америке, Австралии [1, 2]. Среди твердых горючих ископаемых органического происхождения – каустобиолитов – торф по запасам стоит на третьем месте (после горючих сланцев и угля).

Распределение торфяных месторождений по отдельным странам связано с географической широтой, рельефом и геоморфологическим строением местности (табл. 1.6).

О неравномерности распределения торфяных месторождений можно судить по показателю заторфованности территории, под которым понимается отношение площади выявленных торфяных месторождений к общей площади рассматриваемой территории.

Согласно данным «U.S. Geological Survey» в настоящее время в мире добывается около 22 млн т торфа. Пик мировой добычи торфа пришелся на 1984–1985 гг., когда производилось около 380 млн т торфа в год. В последующие годы добыча торфа постоянно сокращалась и к 1992 г. составила всего 29 млн т.

Таблица 1.6

## Распределение запасов торфа

Страна	Запасы торфа, млн т	% к мировым запасам	Страна	Запасы торфа, млн т	% к мировым запасам
Россия	163 658	57,3	Ирландия	5 000	1,8
Финляндия	35 000	12,3	Германия	4 000	1,4
Канада	25 000	8,8	Индонезия	2 500	0,9
США (без Аляски)	14 000	4,9	Исландия	2 000	0,7
Швеция	9 000	3,1	Норвегия	2 000	0,7
Великобритания	8 000	2,8	Куба	900	0,3
ФРГ	6 000	2,1	Другие страны	2 317	0,8
Польша	6 000	2,1			
Итого				28 5375	100

С 2000 по 2011 г. производство торфа в мире практически не изменялось, за исключением роста добычи в 2003 г. За этот период в среднем добывалось около 22–25 млн т торфа. Мировая добыча торфа за 2000–2011 гг. приведена в табл. 1.7.

Таблица 1.7

## Мировая добычи торфа в 2000–2011 гг.

Год	Добыча торфа в мире, млн т	Темп изменения к предыдущему году	Темп изменения к 2000 г.
2000	24,7	–	–
2001	25,7	1,04	1,04
2002	26,3	1,02	1,06
2003	33,7	1,28	1,36
2004	25,6	0,76	1,04
2005	26,0	1,02	1,05
2006	25,8	0,99	1,04
2007	25,7	1,00	1,04
2008	25,1	0,98	1,02
2009	22,9	0,91	0,93
2010	23,4	1,02	0,95
2011	22,0	0,94	0,89

Большая часть торфа производится в Европейском регионе (свыше 90 % в общем объеме мировой добычи), а доля США и Канады составляет чуть более 7 %.

Мировым лидером по объемам добычи торфа в 2011 г. стала Финляндия, где было добыто 4,8 млн т торфа (21,8 % от общемировой добычи). Кроме того, наиболее значимыми странами в добыче торфа являются Ирландия, Белоруссия, Швеция, Россия, Канада.

Показатели добычи торфа по основным странам мира в период с 2004 по 2011 г. приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Показатели добычи торфа по основным странам мира в 2004–2011 гг.

Ранг	Страна	2004 г.		2011 г.		Темп изменения добычи торфа в 2011 г. к 2004 г.	Изменение удельного веса, п.п.
		Добыча торфа, тыс. т	Удельный вес в мире, %	Добыча торфа, тыс. т	Удельный вес в мире, %		
1	Финляндия	9 064	35,41	4 800	21,82	0,53	-13,59
2	Ирландия	5 600	21,88	3 300	15,00	0,59	-6,88
3	Белоруссия	2 108	8,23	3 200	14,55	1,52	6,31
5	Швеция	890	3,48	2 500	11,36	2,81	7,89
4	Россия	2 036	7,95	1 431	6,50	0,70	-1,45
6	Канада	1 347	5,26	950	4,32	0,71	-0,94
7	Латвия	595	2,32	1 000	4,55	1,68	2,22
8	Эстония	1 048	4,09	970	4,41	0,93	0,32
9	Польша	509	1,99	650	2,95	1,28	0,97
10	США	696	2,72	605	2,75	0,87	0,03
11	Другие	1 707	6,67	2 594	11,79	1,52	5,12
	Всего	25 600	100	22 000	100,00	0,86	-

В 2011 г. по сравнению с 2004 г. в связи с мировым кризисом в ведущих торфодобывающих странах произошло снижение добычи торфа: в Финляндии – на 47 %, Ирландии – на 41 %, России – на 29,7 %, Канаде – на 30,0 %, США – на 13 %, Эстонии – на 7,4 %. При этом в некоторых странах объемы добычи торфа в этот период возросли: в Швеции – на 180 %, Латвии – на 68 %, Белоруссии – на 51,8 %, Польше – на 27,7 %.

В мире в 2010 г. большая часть добываемого торфа (64,4 %) использовалась для производства тепла и электроэнергии. В Ирландии доля топливного торфа в общем объеме добычи составляла 92,9 %, в Финляндии – 90 %, Белоруссии – 95,3 %, Швеции – 62,9 %.

В Ирландии в 2006–2009 гг. структура потребления торфа была достаточно стабильна: 79–81 % приходилось на электростанции, 16–20 % направлялось для создания торфяных брикетов и чуть более 1 % использовалось на ТЭЦ. При этом потребление торфа на электростанциях возросло на 29 %, а на ТЭЦ – на 19 %. В 2006 г. из торфа генерировалось 7,4 % электроэнергии, а в 2010 г. – 8,4 %. Таким образом, торфяная отрасль Ирландии ориентирована в первую очередь на производство электроэнергии и создание брикетов.

В Финляндии в 2010 г. из торфа генерировалось 6,8 % электроэнергии и 17,8 % тепла. При этом за период с 2006 по 2009 г. доля потребления торфа на электростанциях (не производящих тепло) сократилась с 34,3 % в 2006 г. до 18,8 % в 2009 г. (при росте доли торфа на котельных с 5,3 до 8,8 %).

В Белоруссии особенностью торфяной промышленности является ориентация на глубокую переработку торфа. Более 88 % топливного торфа идет на производство брикетов на нужды населения и коммунально-бытового сектора. В 2009 г. в котельных сжигалось 7,5 % торфа, а на ТЭЦ – 4 %.

В Швеции торф в основном рассматривается как энергоресурс для отопления. Максимальная доля приходится на ТЭЦ (87,5 % в 2009 г.). Это больше по сравнению с 2006 г. на 11,5 процентных пункта (п.п.) за счет снижения потребления торфа на котельных.

В абсолютном выражении за 2006–2009 гг. потребление торфа ТЭЦ увеличилось на 48 %, а на котельных снизилось на 33,3 %. В энергетическом балансе страны торф составлял менее 1 % в выработке электроэнергии и 4–5 % в производстве тепла.

Объемы торфа, используемого для производства тепла и электроэнергии, по странам мира в 2004 и 2010 г. приведены в табл. 1.9.

Активное развитие торфяной промышленности и использование торфа в сфере производства тепловой и электрической энергии в ведущих торфодобывающих странах мира определялось системным государственным регулированием: принимались программы развития, инвестировались средства, стимулировалось потребление топливного торфа.

Таблица 1.9

Объемы торфа, используемого для производства тепла и электроэнергии

Страна	2010 г.		2004 г.	
	Топливный торф, млн т	Доля топливного торфа в общей добыче, %	Топливный торф, млн т	Доля топливного торфа в общей добыче, %
Финляндия	5,58	86,4	8,16	90,0
Ирландия	2,80	84,8	5,20	92,9
Белоруссия	2,35	90,7	2,01	95,3
Швеция	1,32	51,8	0,56	62,9
Эстония	0,60	62,6	0,28	26,6

Развитие торфяной промышленности России в 2000–2011 гг. характеризовалось устойчивым динамичным снижением добычи торфа. За этот период объемы добычи торфа сократились почти в три раза: с 4,1 млн т торфа 40%-й условной влажности в 2000 г. до 1,4 млн т в 2011 г.

Наибольший спад объемов добычи торфа произошел в 2002–2003 гг. В 2002 г. производство торфа сократилось на 1,5 млн т по сравнению с уровнем предыдущего года, а в 2003 г. уменьшилось еще на 1,5 млн т. В результате в 2003 г. по сравнению с 2001 г. производство торфа составило всего 37,8 % от уровня 2000 г.

В 2004 г. добыча торфа несколько возросла. Однако с 2005 г. объемы его производства сокращались и в 2009 г. составили всего 1,2 млн т.

В 2010 г. в России наметилась тенденция к росту торфодобычи, и уже в 2011 г. производство достигло 1,4 млн т (прирост по сравнению с 2009 г. составил 20,8 %).

Добыча торфа в России осуществляется в Приволжском, Центральном, Северо-Западном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах (ФО). В трех из них (Приволжском, Центральном и Северо-Западном) в 2011 г. было добыто 93 % от всего объема произведенного российского торфа.

За период 2000–2011 гг. добыча торфа снизилась по всем федеральным округам, за исключением Дальневосточного. Наибольшее снижение добычи торфа в 2011 г. произошло в Сибирском ФО: до 5 % от объема добычи в 2000 г. В Уральском и Центральном ФО снижение произошло соответственно до 26,3 и 27,8 % от уровня 2000 г. Наполовину снизилась добыча торфа в Северо-Западном и Приволжском ФО. И только в Дальневосточном ФО наблюдался рост более чем в два раза.

Динамика изменения объемов добычи торфа в России и удельный вес добычи торфа в 2000–2011 гг. приведены в табл. 1.10.



Таблица 1.10

## Добыча торфа в России, тыс. т

Год	Всего	ФО / удельный вес, %					
		Централь- ный	Северо- Запад- ный	Приволж- ский	Ураль- ский	Сибир- ский	Дальне- восточный
2000	4 067	1 333/32,8	365/9,0	1 595/39,2	95/2,3	659/16,2	20/0,5
2005	1 928	926/48,0	166/8,6	733/38,0	77/4,0	2/0,1	24/1,2
2006	1 722	713/41,4	192/11,2	730/42,4	59/3,4	2/0,1	26/1,5
2007	1 725	937/54,3	113/6,6	590/34,2	57/3,3	2/0,1	26/1,5
2008	1 201	369/30,7	142/11,8	614/51,1	39/3,3	3/0,3	34/2,8
2009	1 185	258/21,8	95/8,0	737/62,2	36/3,0	25/2,1	34/2,9
2010	1 316	273/20,7	158/12,0	806/61,3	22/1,7	32/2,4	25/1,9
2011	1 431	371/25,9	214/15,0	747/52,2	25/1,8	33/2,3	41/2,9

В структуре добываемого торфа в Российской Федерации доля топливного торфа в период с 2000 по 2011 г. колебалась от 52,6 до 81 %.

В 2001–2003 гг. доля топливного торфа в общем объеме добычи составляла две трети и более, а с 2004 г. и до сегодняшнего времени – в среднем 75 %.

В 2000–2011 гг. производство топливного торфа в России сократилось почти в два раза. Снижение произошло по всем федеральным округам: в Центральном – до 31 % от объема добычи в 2000 г., в Приволжском и Северо-Западном – до 66,8 и 48,4 % соответственно.

В 2011 г. 94 % топливного торфа добывалось в Приволжском и Центральном ФО.

Из общего объема топливного торфа в 2011 г. 5,7 % было использовано на производство топливных брикетов и полубрикетов.

В 2000–2011 гг. производство топливных брикетов и полубрикетов в России сократилось вдвое.

Брикеты и полубрикеты производятся в Приволжском, Центральном и Северо-Западном ФО. С 2005 г. их производство прекращено в Уральском ФО.

В 2011 г. большая часть брикетов и полубрикетов произведена в Приволжском (23,5 тыс. т, или 55,7 % от всего производства), Северо-Западном (9,6 тыс. т, или 22,7 %) и Центральном ФО – 21,6 %.

Динамика производства топливных брикетов и полубрикетов в России в 2000–2011 гг. приведена в табл. 1.11.

По данным энергетического баланса России большая часть топливного торфа (77–85 %) в 2007–2011 гг. использовалась для производства электро- и теплоэнергии. При этом доля топливного торфа для производ-

ства электроэнергии постоянно снижалась и составила в 2011 г. 31,3 %, тогда как его доля для производства теплоэнергии возросла до 68,7 %.

Таблица 1.11

Динамика изменения производства топливных брикетов и полубрикетов

Год	Производство топливных брикетов и полубрикетов, тыс. т	Темп изменения к предыдущему году, доля	Темп изменения к 2000 г., доля	Удельный вес топливных брикетов и полубрикетов в топливном торфе, %
2000	99,8	–	–	6,8
2001	67,6	0,677	0,677	3,4
2002	96,6	1,429	0,968	6,3
2003	92,8	0,961	0,930	15,2
2004	76,0	0,819	0,762	7,5
2005	49,2	0,647	0,493	4,5
2006	57,0	1,159	0,571	6,0
2007	40,1	0,704	0,402	4,4
2008	44,8	1,117	0,449	8,7
2009	53,4	1,192	0,535	8,7
2010	39,4	0,738	0,395	5,3
2011	42,2	1,071	0,423	5,7

Перевозить торф, используемый как топливо, на большие расстояния невыгодно в силу его относительно низкого калорийного эквивалента. Таким образом, при использовании торфа в качестве топлива большая его часть потребляется в регионах добычи, что позволяет рассматривать одновременно производство и потребление в региональном разрезе.

В целом топливный торф имеет хорошие перспективы в развитии и использовании при местном его потреблении: поскольку транспортные затраты минимальны, он может быть востребован на малых электростанциях и в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Ботаническая классификация выделяет 37 наиболее часто встречающихся пластообразующих видов торфа. Встречаемость их в резервном торфяном фонде Европейской части России различна. От общих запасов она составляет от 0,1 % (вахтовый торф) до 16,3 % (магелланикум-торф). К распространенным относятся только 10 видов. Запасы по каждому из них составляют более 3 % от резервного фонда. Наибольшую встречаемость имеют в торфе низинного типа осоковый (15,6 %), древесный (6,2 %), древесно-осоковый (4,7 %), в торфе переходного типа – древесно-

сфагновый (3,1 %), осоково-сфагновый (3,4 %) и сфагновый (3,9 %), в торфе верхового типа – магелланикум (16,3 %), фускум (9,8 %), пушицево-сфагновый (6,0 %) и комплексный верховой (3,5 %) виды. Если учесть, что запасы торфа верхового типа составляют около половины всего резервного фонда (47,6 %), то перечисленные выше четыре вида составляют более 76 % от общих запасов верхового торфа. Таким образом, 10 наиболее распространенных видов торфа составляют 72 % запасов резервного торфяного фонда Европейской части страны.

Россия занимает первое место в мире по запасам торфа, доля ее в общемировых запасах по разным оценкам составляет от 40 до 60 %. Торфяные ресурсы выявлены на территории 63 субъектов федерации по шести федеральным округам. Общая площадь торфяных месторождений составляет около 86 млн га.

Торфяные месторождения имеют широкое распространение – от западных районов России до Камчатки на востоке и от Кольского полуострова на севере до Закавказья на юге. Наибольшая их концентрация отмечается в районах северо-запада и севера Европейской части России, Западной Сибири, Дальнего Востока и Камчатки.

В целом торфяные ресурсы составляют почти 200 млрд т, из которых более 166 млрд т охвачено поисковыми, предварительными или детальными разведками. Выявленные и разведанные торфяные ресурсы представлены 63 827 торфяными месторождениями общей площадью в нулевой границе 69 896 тыс. га и в границе промышленной глубины торфяной залежи 48 771 тыс. га.

Запасы торфа, как и других твердых полезных ископаемых, по степени изученности подразделяются на разведанные (категории А, В и С) и предварительно оцененные (категория С<sub>1</sub>). Прогнозные ресурсы по степени их обоснованности подразделяются на категории Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub>, Р<sub>3</sub>.

Общегеологические запасы торфа России распределяются следующим образом: разведанные запасы торфа в стране составляют 29,4 млрд т, или 14,7 %; предварительно оцененные – 26,1 млрд т, или 13,0 %; прогнозные – 144,5 млрд т, или 72,3 %.

Почти половина прогнозных ресурсов торфа (48,3 %) относится к Уральскому ФО, который занимает по прогнозным запасам торфяных ресурсов первое место в России. На втором месте находится Сибирский ФО – 34,4 млрд т, или 21,8 % прогнозных ресурсов России.

Балансовые и забалансовые (общие) запасы торфа в Российской Федерации оценены в 38,3 млрд т.

Распределение общих запасов торфа, включая забалансовые запасы, на 21 165 торфяных месторождениях по федеральным округам следующее:

Центральный ФО – 7 287 месторождений, общий объем запасов – 4 059 млн т;

Северо-Западный ФО – 5 796 месторождений, общий объем запасов – 10 104 млн т;

Приволжский ФО – 5 136 месторождений, общий объем запасов – 2 321 млн т;

Уральский ФО – 1 410 месторождений, общий объем запасов – 8 358 млн т;

Сибирский ФО – 1 116 месторождений, общий объем запасов – 10 972 млн т;

Дальневосточный ФО – 420 месторождений, общий объем запасов – 2 505 млн т.

Удельный вес общих запасов торфа в РФ приведен в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Удельный вес общих запасов торфа в РФ  
по федеральным округам, млн т

Центральный	10,6
Северо-Западный	26,4
Приволжский	6,1
Уральский	21,8
Сибирский	28,6
Дальневосточный	6,5
Итого	100,0

Наибольшая доля общих запасов торфа наблюдается в Сибирском (28,6 %), Северо-Западном (26,4 %) и Уральском ФО (21,8 %). В этих трех федеральных округах сосредоточено почти 80 % общих запасов торфа России.

Балансовые запасы торфа в России составляют 30,8 млрд т 40%-й условной влажности, или более 10,7 млрд т условного топлива.

Балансовые запасы торфа категории А + В + С<sub>1</sub> в Российской Федерации составляют 19,1 млрд т, категории С<sub>2</sub> – 11,9 млрд т, которые размещены на 20 984 торфяных месторождениях. Сюда включены и месторождения площадью до 10 га. Наибольший объем балансовых запасов торфа (А + В + С<sub>1</sub>) разведан в Сибирском (33,8 %), Северо-Западном (27,0 %) и Уральском ФО (23,6 %), что составляет 84,4 % от общего объема балансовых запасов торфа России.

Распределение балансовых запасов торфа (40%-й условной влажности) следующее:

Центральный ФО – 2 179,6 млн т,

Северо-Западный ФО – 8 312,2 млн т,

Приволжский ФО – 1 185,9 млн т,

Уральский ФО – 7 260,9 млн т,  
 Сибирский ФО – 10 407,4 млн т,  
 Дальневосточный ФО – 1 470,7 млн т.

Удельный вес балансовых запасов торфа по федеральным округам России приведен в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Удельный вес балансовых запасов торфа в РФ,  
 по федеральным округам, млн т

Центральный	7,1
Северо-Западный	27,0
Приволжский	3,8
Уральский	23,6
Сибирский	33,8
Дальневосточный	4,8
Итого	100,0

Извлекаемые запасы торфа (по технологическим параметрам добычи торфа) в России составляют 18,5 млрд т 40%-й условной влажности, или почти 6,5 млрд т условного топлива.

Объемы извлекаемых запасов торфа по федеральным округам России приведены в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Объем извлекаемых запасов торфа в РФ  
 по федеральным округам, млн т

Центральный	1 307
Северо-Западный	4 987
Приволжский	711
Уральский	4 357
Сибирский	6 245
Дальневосточный	882
Итого	18 490

Наибольшая доля извлекаемых запасов торфа наблюдается в Сибирском (33,8 %), Северо-Западном (27,0 %) и Уральском ФО (23,6 %). В этих трех федеральных округах сосредоточено почти 85 % извлекаемых запасов торфа России.

Представляют интерес соотношения между общими, балансовыми и извлекаемыми запасами торфа по федеральным округам России. Доля балансовых и извлекаемых запасов торфа в общих запасах торфа по федеральным округам России представлена в табл. 1.15.

Таблица 1.15

Доля балансовых и извлекаемых запасов торфа  
в общих запасах торфа в РФ

ФО	Доля балансовых запасов в общих запасах, %	Доля извлекаемых запасов в общих запасах, %
Центральный	53,7	32,2
Северо-Западный	82,3	49,4
Приволжский	51,1	30,7
Уральский	86,8	52,1
Сибирский	94,9	56,9
Дальневосточный	58,7	34,4

Доля извлекаемых запасов торфа к балансовым запасам по всем федеральным округам составляет 60 %. Большая часть извлекаемых запасов торфа по своей качественной характеристике (тип залежи, степень разложения, зольность, теплота сгорания) удовлетворяет установленным условиям для его использования в сфере производства тепловой и электрической энергии.

Таким образом, потенциал существующей сырьевой базы торфяных месторождений и их рациональное использование на территории многих федеральных округов и субъектов Российской Федерации может обеспечить работу торфяной промышленности с годовой добычей порядка 20–25 млн т на протяжении длительного периода.

### Контрольные вопросы

1. Сколько видов торфа выделяет ботаническая классификация?
2. Сколько торфа согласно данным «U.S. Geological survey» добывается в настоящее время?
3. В каких районах России осуществляется добыча торфа?
4. На какие категории распределяются запасы полезных ископаемых по степени изученности?
5. В какой период производство топливных брикетов в России сократилось в два раза?
6. В каких округах наблюдается наибольшая доля извлекаемых запасов?
7. Какова структура распределения общегеологических запасов торфа России?
8. Каковы тенденции добычи торфа и его использования в сфере производства тепловой и электрической энергии в РФ?

#### **1.4. Классификация и основные направления использования торфяных ресурсов**

Во всем мире торфяные ресурсы используются достаточно интенсивно. Создана мощная, высокоразвитая, оснащенная современной техникой торфяная отрасль народного хозяйства. Торф применяется преимущественно в топливно-энергетических целях и для нужд сельского хозяйства. Торфяные месторождения после гидротехнических мелиораций [11] преобразуются в высокоплодородные сельскохозяйственные угодья. В незначительных объемах торф используется как химическое сырье [12] и сырье для производства различных видов продукции сельскохозяйственного назначения и зеленого строительства. Наиболее ценные составляющие торфа, такие как битумы, углеводный комплекс, гуминовые вещества и другие органические соединения, после извлечения можно применять для получения кормовых дрожжей и прочих видов грубых кормов, различных марок восков, активных углей, сорбентов для охраны окружающей среды и специальных производств, гуминовых соединений различного назначения, комплексных органоминеральных удобрений, в том числе в гранулированном виде, физиологически активных веществ, медицинских препаратов и других продуктов органического синтеза.

Велика роль торфяных месторождений в охране окружающей среды. Современное использование торфа и торфяных месторождений нельзя считать достаточно рациональным и эффективным. Большое количество торфа сжигается в топках тепло- и электростанций, значительные площади мелиорированных торфяных месторождений заброшены. Отсутствуют оптимальные технологические схемы комплексного использования торфяных месторождений. Низинные торфяные месторождения наиболее перспективно использовать в сельском хозяйстве и для топливно-энергетических целей, а верховые в силу их генетического строения, состава и свойств торфа – для производства ряда новых дефицитных материалов.

В настоящее время в промышленном или опытно-промышленном вариантах осваиваются новые схемы мелиорации торфяников как сельскохозяйственных угодий с учетом их максимальной продуктивности и минимальных потерь органического вещества в результате эрозии и минерализации; новые способы получения органических, органоминеральных гранулированных удобрений, включающих необходимый набор микроэлементов – различных питательных грунтов, ростовых веществ, кипованной подстилки, субстратных торфяных плит, торфяного дерна, торфяных горшочков, микропарников, и других видов новой продукции для сельского хозяйства и зеленого строительства.

По результатам исследований состава углеводной части торфа и процессов его гидролиза и микробного синтеза разработаны схемы меха-

нотермобioхимической переработки торфа с получением кормовых дрожжей, белковых и углеводных концентратов, пропаренного и автоклавированного торфа как кормового материала, торфо-амидоконцентратных добавок осахаренного торфа, торфо-бардяного корма, биостимуляторов различного назначения. Специальными исследованиями установлено полное отсутствие примесей канцерогенных веществ в продуктах микробного синтеза на средах, состоящих из торфяных гидролизатов. Показана перспективность совместной переработки торфа и древесины, заключающаяся в значительной интенсификации накопления биомассы за счет биологической активности гуминовых веществ торфа. Отработаны и освоены схемы утилизации негидролизуемого остатка торфа с получением удобрений, сорбентов и топливных брикетов.

Наличие физиологически активных веществ в отдельных соединениях торфа определяет его медицинские возможности. Широко известно применение торфа в бальнеологии в качестве лечебных грязей и как сырья для выделения различных экстрактов, используемых при изготовлении лечебных мазей, специальных биологически активных добавок при производстве очистителей рук, жидких моющих средств, зубных паст и т. д. [13].

Как химическое сырье торф прежде всего оценивается содержанием углеводов, битумов и гуминовых веществ. Разработаны технологические схемы получения на основе торфа различных марок сырых и модифицированных восков, гуминовых кислот, углеродных адсорбентов, в том числе с молекулярно-ситовыми свойствами, металлургического кокса, этилового спирта, фурфурола, глицерина, этиленгликоля, многоатомных спиртов, наполнителей полимеров, торфощелочных реагентов для буровой техники и промышленности строительных материалов, катализаторов, металлоуглеродных волокон, бумаги, органических красителей, ионообменных материалов и сорбентов селективного действия для улавливания вредных примесей из газовых и жидких сред.

Торфяной воск в результате глубокого изучения его природы, состава и свойств находит применение в точном литье по выплавляемым моделям, производстве пластических масс, товаров бытовой химии, медицинских препаратов, материалов для полиграфии, косметической промышленности. Установлена пригодность торфяных восков для получения разделительных смазок (антиадгезионных составов) при производстве изделий различного назначения из пенополиуретанов. Российскими учеными разработаны и апробированы в промышленных условиях технологические схемы газификации торфа и получения на его основе жидких топлив. Наряду с решением задач по комплексной переработке торфа все большее внимание уделяется значению торфяных месторождений для сохранения гидрологического равновесия в экологических системах.



На торфяных месторождениях сформировались специфические флора и фауна. На верховых сфагновых болотах произрастают ценные виды лекарственных растений (росянка, валерьяна, вахта трехлистная, багульник болотный и др.), клюква, брусника, голубика. Эти дары природы приобретают все большее значение в медицине и пищевой промышленности.

Торфяные месторождения играют важную роль в регулировании водного режима окружающей территории, поддерживают уровень грунтовых вод, давая начало водному питанию мелких рек и озер. При осушении болота утрачивают свойственные им функции аккумуляторов влаги и регуляторов поверхностного стока, что сказывается на климатических условиях, водном и тепловом балансах района их размещения. По этой причине торфяные месторождения включаются в заповедники, заказники, национальные парки, научные полигоны и т. д.

Торфяной фонд подразделяют на пять групп: разрабатываемый, земельный, охраняемый, запасной, резервный. По этой классификации охрана болот понимается как один из видов использования болот в неизменном естественном состоянии для научных, защитных и рекреационных целей. Для выявления торфяных месторождений в качестве природоохранных объектов имеются специальные методические указания и критерии [14].

Таким образом, в зависимости от состава и свойств торфяного сырья, взаимосвязей торфяно-болотных комплексов с окружающей средой можно выделить направления использования торфяных ресурсов:

топливно-энергетическое,  
сельскохозяйственное,  
химико-технологическое,  
медицинское,  
природоохранное.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите направления использования торфа.
2. Какие продукты получают из торфа при его химической переработке?
3. Какова роль торфа в охране окружающей среде?
4. Перечислите виды торфяной продукции для топливно-энергетического использования.
5. Какие производятся виды торфяной продукции?

## 2. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФА

### 2.1. Плотность сухого вещества торфа

Плотность  $\rho$  определяется как отношение массы атомов сухого беспористого вещества  $m_c$  к их объему  $V_c$ :

$$\rho = \frac{m_c}{V_c}.$$

Аналитически плотность можно выразить через истинную плотность органического вещества  $\rho_r$  и золы  $\rho_z$ . Если принять, что  $V_c = V_r + V_z$ , или

$V_c = \frac{m_c - m_z}{\rho} + \frac{m_z}{\rho_z}$ , где  $m_z$  – масса золы,  $V_r$  – объем органического вещества торфа,  $V_z$  – объем золы, то

$$\rho = \frac{100\rho_z\rho_r}{100\rho_z - A(\rho_z - \rho_r)}.$$

Обычно в расчетах полагают  $\rho_r = 1\,500 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_z = 2\,650 \text{ кг/м}^3$ , тогда

$$\rho = \frac{345\,000}{230 - A}.$$

Истинная плотность органического вещества зависит от состава торфа, который меняется в зависимости от степени разложения и вида. Приближенно  $\rho_r$ ,  $\text{кг/м}^3$ , можно рассчитать по эмпирической формуле Я.В. Великина [1, 15]:

$$\rho_r = 1\,600 - 3,33 R,$$

где  $1\,600 \text{ кг/м}^3$  – плотность неразложившегося органического вещества;  $R$  – степень разложения, %.

При увеличении зольности плотность будет увеличиваться, так как  $\rho_z > \rho_r$ . Приближенная зависимость плотности от зольности [1]

$$\rho = \rho_r (1 + 0,005A).$$

Совместным действием степени разложения и зольности можно пренебречь, так как ошибка от этого не превышает 2 % даже при  $R = 50 \%$  и  $A = 50 \%$ . Фактические значения плотности, определенные экспериментально (табл. 2.1) и рассчитанные по уравнению

$$\rho = 1\,600 - 3,33 R + 8 A - 0,0166 R A,$$

дают различия в  $30\text{--}100 \text{ кг/м}^3$  в сторону завышения расчетных результатов, то есть максимальная погрешность составляет порядка 10 %. Уменьшение плотности с повышением степени разложения объясняется увеличением битуминозности торфа (плотность битумов меньше  $1\,000 \text{ кг/м}^3$ ). В то же время увеличение степени разложения сопровождается повышением зольности, поэтому действительная зависимость гораздо сложнее.

Таблица 2.1

Значения плотности сухого вещества торфа, кг/м<sup>3</sup>

Степень разложения, %	Зольность, %						
	Верховой			Низинный			
	2	4	8	10	14	18	25
5	1 570	1 590	1 560	1 590	1 620	1 650	1 710
10	1 560	1 570	1 540	1 570	1 600	1 630	1 690
20	1 530	1 540	1 510	1 540	1 570	1 600	1 660
30	1 500	1 510	1 480	1 510	1 540	1 570	1 630
40	1 470	1 480	1 450	1 490	1 500	1 550	1 610
50	1 430	1 450	1 430	1 460	1 500	1 530	1 590
60	1 400	1 410	–	–	–	–	–

Плотность сухого вещества (истинная плотность) обычно определяется пикнометрическим методом, а в качестве пикнометрической жидкости берется вода. Физическая сущность метода заключается в том, что жидкость с очень малыми размерами молекул будет проникать во все поры. Вытесненный объем жидкости приравнивается к объему сухого вещества и обычно рассчитывается по известному значению плотности пикнометрической жидкости. Для удаления воздуха проводят вакуумирование или кипячение [16]. Порядок определения объема твердой фазы поясняется схемой (рис. 2.1).

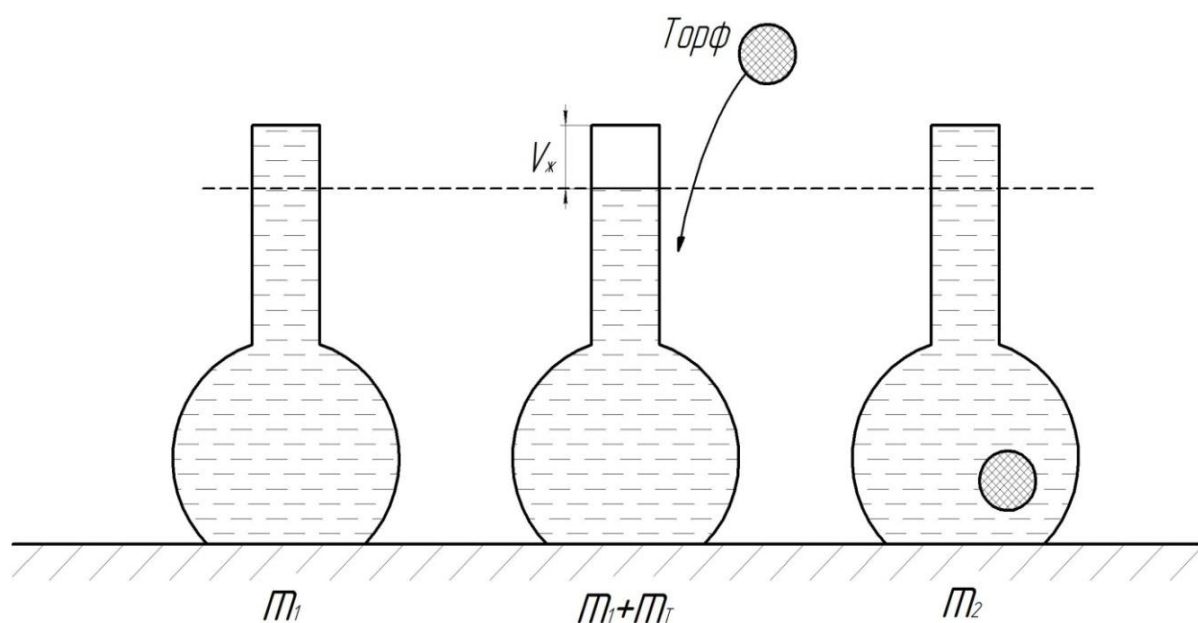


Рис. 2.1. Схема расчета твердой фазы торфа по результатам взвешиваний:

 $m_1$  – масса пикнометра с жидкостью, налитой до метки; $m_2$  – масса пикнометра с торфом и жидкостью, налитой до метки; $m_1 + m_2$  – масса пикнометра с жидкостью и торфом

В этом случае торф вытеснит часть жидкости  $V_{ж}$ , которая поднялась выше метки. Зная плотность пикнометрической жидкости, можно вычислить объем торфа  $V_T$ :

$$V_T = \frac{m_1 + m_T + m_2}{\rho_{ж}},$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность пикнометрической жидкости. Торф содержит некоторое количество воды, объем которой определяют по известной влажности и плотности воды при данной температуре:

$$V_B = \frac{m_T w}{100 \rho_B}.$$

Тогда объем сухого вещества торфа  $V_c = V_T - V_B$ , а плотность

$$\rho = \frac{m_T (100 - w)}{100 \left( \frac{m_1 + m_T + m_2}{\rho_{ж}} - \frac{m_T w}{100 \rho_B} \right)}.$$

Предполагалось, что вода в торфе всегда представлена отдельной фазой, но при низких влажностях молекулы воды расположены дискретно и не образуют фазы. В этом случае плотность для объемной жидкости нельзя применять к дискретным молекулам. Кроме того, сорбированная вода образует с органическим веществом торфа единый комплекс с измененной физической структурой и по этой причине имеет разные значения, уменьшающиеся с ростом влажности [10].

Применение для пикнометрирования жидкостей с разными размерами молекул дает различные значения плотности. Н.И. Гамаюнов и Н.Е. Яценко [17] показали, что плотность находится в обратной зависимости от диаметра молекул пикнометрической жидкости, и определили, что плотность торфа равна 1 800–1 700 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, определяемые величины плотности беспористого вещества торфа при какой-то одной жидкости дают значения, в большей или меньшей степени приближенные к истинному. Чаще всего для анализа используют воду или неполярные жидкости – керосин, бензин, толуол.

Л.С. Амарян предложил метод определения истинной плотности твердой фазы путем прессования торфа [18]. С этой целью торф влажностью меньше 25 % помещается в прецизионную матрицу и сжимается до двухфазного состояния при давлении 500–1 000 МПа. Далее, зная площадь матрицы и высоту обжатого торфа, рассчитывается плотность:

$$\rho = \frac{m_T (100 - w)}{100 \left( f h - \frac{m_T w}{100 \rho_B} \right)},$$

где  $f$  – площадь матрицы;  $h$  – высота брикета в сжатом состоянии.

В расчетах принимается величина истинной плотности 1 500 кг/м<sup>3</sup>.

### Контрольные вопросы

1. Что называют плотностью сухого вещества?
2. От чего зависит истинная плотность?
3. Как зольность влияет на плотность сухого вещества?
4. Расскажите сущность пикнометрического метода определения плотности сухого вещества.
5. Какими методами можно определить истинную плотность?
6. Как изменяется плотность сухого вещества в зависимости от степени разложения и типа торфа?
7. Кто предложил метод определения истинной плотности твердой фазы путем прессования торфа?

### 2.2. Плотность торфа, торфяной продукции и методы ее определения

Плотностью торфа называют отношение массы торфа к его объему. Для того чтобы отличать плотность кажущуюся от плотности сухого беспористого вещества (истинной), плотность кажущуюся обозначают как  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{m_T}{V}.$$

В общем случае торф находится в трехфазном состоянии:

$$V = V_c + V_B + V_T,$$

где  $V_c$ ,  $V_B$ ,  $V_T$  – объемы сухого вещества, воды и газа соответственно. По этой причине плотность торфа всегда меньше плотности сухого вещества. Если все поры торфа заполнены водой, то плотность торфа однозначно зависит от влажности и будет максимальной:

$$\gamma_{\max} = \frac{m_T}{V_c + V_B} = \frac{100 \rho \rho_B}{100 \rho_B - \rho_B w + \rho w}.$$

Принимаем  $\rho_B = 1\,000 \text{ кг/м}^3$ , тогда

$$\gamma_{\max} = \frac{m_T}{V_c + V_B} = \frac{(1 + W) \rho}{1 + \frac{W \rho}{1\,000}},$$

где  $W$  – влагосодержание, кг/кг.

Для реальных условий однозначной зависимости плотности от влажности получить не удастся. Многочисленные попытки в этом направлении дают лишь приближение к действительности. Так, К.П. Лундин предлагает для вычисления плотности формулу

$$\gamma = \left( \frac{100 - n_{\Gamma}}{100} \right) \frac{(1 + W)\rho}{1 + W\rho/1000},$$

где  $n_{\Gamma}$  – газонасыщенность, то есть содержание газа в объеме торфа, % [19].

Зависимость газонасыщенности от влагосодержания выражается формулой

$$n_{\Gamma} = n_{\Gamma}^0 / e^{\mu W},$$

где  $n_{\Gamma}^0$  – содержание воздуха в объеме торфа при абсолютно сухом состоянии;  $\mu$  – коэффициент, характеризующий изменение содержания воздуха с изменением влажности. Для переработанного и высушенного торфа эти значения приведены в табл. 2.2 [19].

Таблица 2.2

Значения  $n_{\Gamma}^0$  и  $\mu$  для переработанного торфа в форме цилиндрического куска

Степень разложения, %	Верховой торф		Низинный торф	
	$n_{\Gamma}^0$	$\mu$	$n_{\Gamma}^0$	$\mu$
10	78	0,242	–	–
20	60	0,65	60	0,9
30	50	0,85	48	0,85
40	45	1,0	35	0,75
50	40	1,08	20	0,67
60	38	1,15	–	–

Согласно данным табл. 2.2 уменьшение доли газа в сухом торфе происходит по мере увеличения дисперсности. При этом для верхового торфа довольно быстро затухает, приближаясь к 40–38 %, но показатель степени растет, то есть в верховом торфе не обнаружено тенденции к стабилизации плотности с ростом дисперсности. Для низинного торфа характерно уменьшение содержания воздуха в объеме торфа при абсолютно сухом состоянии и одновременно с этим падение показателя степени дисперсности, то есть при максимальной дисперсности, выше которой плотность практически не изменяется.

Уравнение, по которому можно с некоторым приближением прогнозировать изменение плотности торфа при изменении влагосодержания:

$$\gamma = \left( 1 - \frac{n_{\Gamma}^0}{100e^{\mu W}} \right) \frac{(1 + W)\rho}{1 + W\rho/1000}.$$

Более удобная форма зависимости плотности от влагосодержания получена на основе уравнения С.С. Корчунова, связывающего изменение объема и влагосодержания [20]:

$$V = V_c(1 + kW),$$

где  $V$  – объем при влагосодержании  $W$ ;  $V_c$  – объем торфа при  $W = 0$ ;  $k$  – коэффициент объемной усадки.

Тогда уравнение зависимости плотности от влагосодержания будет иметь вид

$$\gamma = \frac{m}{V_c(1 + kW)} = \gamma_0 \frac{1 + W}{1 + kW},$$

где  $\gamma_0$  – плотность торфа в сухом состоянии. Это уравнение можно использовать, если экспериментально установлены значения плотности торфа в сухом состоянии и коэффициент объемной усадки.

Плотность зависит не только от влажности, но и от дисперсности. При этом дисперсность мало изменяет плотность торфа во влажном состоянии, но при сушке влияние дисперсности очень высоко.

Зольность на плотность влияет как через истинную плотность твердой фазы, так и через контактные взаимодействия агрегатов торфа, увеличивая или уменьшая их. Насыпная плотность – масса сыпучего вещества в объеме свободной засыпки. Этой величиной характеризуется фрезерный торф, а также кусковой и брикеты при нахождении их в складочных или транспортных единицах. Между плотностью отдельного куска торфа и насыпной в штабеле установлена зависимость:

$$\gamma_{\text{нас}} = \frac{100 - n}{100} \gamma_{\text{кус}} = \delta \gamma_{\text{кус}},$$

где  $n$  – пористость штабеля;  $\delta$  – плотность упаковки кусков в штабеле;  $\gamma_{\text{кус}}$  – плотность отдельного куска [21]. Например, для верхового торфа при влажности 20 % значения  $\delta = 0,47$ ; при 30 % – 0,5; при 40 % – 0,52; при 50 % – 0,57 [21]. Для низинного торфа как малопрочного можно принять одно значение  $\delta = 0,57$  при любой влажности.

Плотность скелета торфа – отношение массы сухого вещества торфа (скелета) ко всему объему торфа (объему влажного материала):

$$\gamma_c = \frac{m_c}{V} = \frac{m_r(100 - w)}{100V} = \frac{\gamma(100 - w)}{100} = \frac{\gamma}{1 + W}.$$

Понятие «плотность сухого вещества» (скелета) часто встречается в теории сушки, для характеристики минерализации торфа при сельскохозяйственном использовании месторождений, при компрессионных исследованиях и т. д. (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Значения плотности торфа и торфяной продукции, кг/м<sup>3</sup>

Вид продукции, сырьё	Плотность	Плотность сухого вещества (скелета)
Неосушенная торфяная залежь	1 000	110
Осушенная залежь: при экскаваторном способе добычи	800–1 000	120–110
при фрезерном способе	600–900	150–220
в пахотном горизонте торфяных почв	600–1 000	200–400
Торф фрезерный (насыпная плотность)	200–500	120–300
Торф кусковой: в штабелях	300–500	200–330
в отдельных кусках	400–1 000	270–600
Торфяной брикет	1 100–1 400	
Изоплиты	170–250	
Подстилки: насыпная	100–150	60–90
прессованная в кипы	170–250	100–150
ТМАУ 60%-й влажности	500–600	

### Методы определения плотности

Плотность торфа в залежи определяется методом режущего кольца. С этой целью кольцо с заостренными кромками и известным объемом вдавливается в залежь. Вынутый вместе с кольцом торф зачищается по торцам и взвешивается. Масса торфа, деленная на объем кольца, дает плотность в залежи. Для получения достоверного результата число измерений должно быть не менее пяти. Точность измерений растет с увеличением диаметра кольца.

Плотность торфа в залежи для инженерных расчетов берется из таблиц С.А. Сидякина (см. прил. 5, 6, [15]) или может быть рассчитана по уравнениям [10, 15]:

для верхового торфа

$$\gamma = \frac{1\,400R}{100 - w + R} - 4R + 60,$$

для низинного торфа

$$\gamma = \frac{1\,700R}{100 - w + R} - 5R + 90.$$

Во время осушения месторождения и работы на нем машин плотность торфа по сравнению с таблицами С.А. Сидякина повышается. В слое 20–25 см при фрезерном способе добычи плотность возрастает на 10–30 %.



С увеличением глубины экскавации уплотняющее действие машин снижается и различие между наблюдаемой плотностью и табличными значениями уменьшается.

Насыпная плотность фрезерного торфа в полевых условиях определяется с помощью мерного ящика объемом  $0,1 \text{ м}^3$  ( $0,5 \times 0,5 \times 0,4$ ). Для этого из навалов торфа или из валков проводится 10 взвешиваний и находится средняя величина. Плотность торфа в штабелях определяется с помощью пробоотборника, имеющего емкость 1 л. Каждая проба торфа взвешивается отдельно, берется средняя величина. В лабораторных условиях насыпная плотность находится с помощью пурки. Засыпка торфа и уплотнение его в мерном цилиндре пурки постоянны, что исключает субъективизм в измерении, так как для сыпучих материалов метод засыпки играет большую роль. Насыпная плотность торфа в расстиле может быть определена по формуле Апта [1]:

$$\gamma = \frac{1}{1,233} \left[ a + \frac{R}{R + (100 - w)^{1,25}} - 0,012 \right] (1 + 0,1H^{0,6} + 0,2h^{0,4}),$$

где  $a$  – величина, зависящая от типа торфа: для верхового  $a = 0,01$ , для низинного  $a = 0,04$ ;  $R$  и  $w$  в процентах;  $H$  – высота ссыпания торфа (в пределах  $0,5$ – $5,0$  м);  $h$  – толщина насыпного слоя  $0,25$ – $3,00$  м,  $\text{т/м}^3$ .

В процессе хранения в штабелях торф слеживается и дает усадку, плотность его повышается. Увеличение плотности зависит от высоты штабеля. Для расчетов пользуются таблицами Сидякина – Шифрина [22], составленными для торфа влажностью  $37$ – $49$  % по состоянию на 1 октября. Более длительное время хранения мало изменяет плотность торфа в штабеле.

### **Плотность окускованного торфа (кускового и брикетов)**

Объем куска (брикета) определяется путем измерения размеров, если имеют дело с продукцией правильной формы. Если кусок не имеет правильной формы, то объем определяется с помощью волюменометра, методом гидростатического взвешивания или путем засыпки мелким песком [16].

Волюменометр представляет собой цилиндрический сосуд с сообщающейся мерной трубкой. В сосуд заливается жидкость, в которую помещают кусок предварительно пропитанного в керосине торфа. По разности отметок уровней жидкости в мерной трубке определяют объем помещенного торфа. Жидкость следует брать такую, чтобы в ней не происходило набухание образца. Такой жидкостью является обезвоженный керосин. Набухания торфа в нем не обнаружено даже при хранении в течение 1 месяца. Торф (как кусковой, так и брикеты) в керосине не набухает. Предварительная пропитка нужна для того, чтобы заполнить все поры и провести определение внешнего объема.

Засыпка в песок является разновидностью волюменометрического метода. Для этого берется отмытый от глины высушенный песок и просеивается через сито 0,25 мм. Подситовая часть используется для анализа. Определяется насыпная плотность песка. Для этого в стакан (~500 мл) через воронку засыпается песок. Расстояние от края стакана до воронки принимается 4–5 см, оно остается постоянным для всех измерений. Песок засыпается так, чтобы при свободной засыпке образовался конус лишнего песка, который снимают линейкой. Далее, зная массу песка и емкость стакана, находят насыпную плотность. Плотность торфа определяют следующим образом. Взвешивают кусок торфа ( $m_T$ ), помещают его в стакан и засыпают песком до свободного ссыпания. Излишки песка убирают линейкой и взвешивают стакан. Стакан + песок + торф =  $m_1$ . Разность  $m_1 - m_T \equiv m_{\text{п}}$  – масса песка. Плотность торфа рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{m_T \gamma_{\text{п}}}{m_2 + m_T + m_1},$$

где  $\gamma_{\text{п}}$  – насыпная плотность песка;  $m_2$  – масса стакана с одним песком.

Метод гидростатического взвешивания основан на законе Архимеда. Взвешивание ведут в воздухе и в жидкости (керосин). Вес торфа в воздухе  $P_T = m_T g$ . Затем торф пропитывается в керосине и после пропитки взвешивается там же.

Вес в керосине  $P_{\text{ж}}$  будет меньше на величину выталкивающей силы, которая равна весу жидкости в объеме тела. Отсюда объем жидкости, равный объему торфа,  $\text{м}^3$ :

$$V = \frac{m_T g - P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} g},$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность керосина при данной температуре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Далее рассчитывают плотность торфа

$$\gamma = \frac{m_T \rho_{\text{ж}} g}{m_T g - P_{\text{ж}}}.$$

### **Метод измерения плотности торфа с помощью радиобура**

Для определения насыпной плотности торфа в Калининском политехническом институте (ныне ТвГТУ) была разработана конструкция радиобура, регистрирующего рассеянное гамма-излучение, возникающее в результате взаимодействия первичных гамма-квантов источника с электронами окружающей среды [1, 23]. Вылетающие из источника прямолинейно гамма-кванты после ряда столкновений изменяют свою траекторию так, что возвращаются обратно и регистрируются счетчиком (рис. 2.2). Измерение плотности основано на предположении о пропорциональности между количеством электронов в окружающей среде и плотностью вещества.

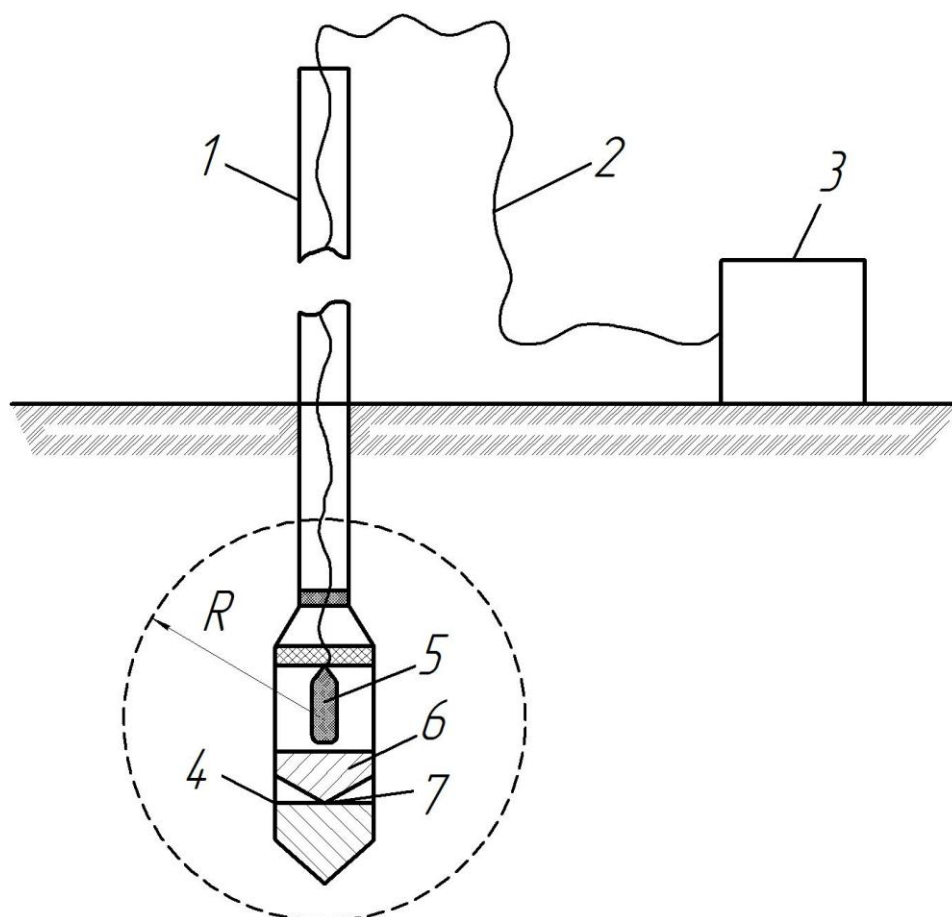


Рис. 2.2. Схема радиобура: 1 – штанга; 2 – экранированный кабель; 3 – пересчетное устройство; 4 – челнок; 5 – счетчик; 6 – свинцовый экран; 7 – источник гамма-квантов

Источник излучения  $\text{Co}^{60}$  отгораживается от прямого попадания излучения на счетчик свинцовой защитой. Счетчик находится внутри герметически закрытого стакана из плексигласа и соединен кабелем с пересчетным устройством. Штанги подключаются к кабелю через разъемы. Общая длина штанг 4,5 м. Масса радиобура со всеми штангами без измерительного устройства – 5,3 кг. Радиус действия рассеянного излучения  $\sim 0,5$  м. Прямая пропорциональность между плотностью вещества и интенсивностью рассеянного излучения справедлива при плотности торфа до  $1\ 000\ \text{кг/м}^3$ . При большей плотности наблюдается обратная зависимость вследствие уменьшения вероятности попадания рассеянных квантов в пространство счетчика. Так как объем анализируемой пробы приблизительно равен 500 л, воспроизводимость результатов в 6–7 раз выше по сравнению с обычными методами. Для измерения с помощью бура челнок погружается в штабель на глубину от поверхности не менее чем 0,5 м, и измеряется число импульсов. Время замера составляет 4–5 мин. Затем по тарировочной кривой находят плотность торфа.

## Контрольные вопросы

1. Что называют плотностью торфа?
2. Дайте определение насыпной плотности.
3. Назовите методы определения плотности.
4. Для чего необходимы таблицы С.А. Сидякина?
5. Что такое плотность окускованного торфа?
6. Как определить плотность окускованного торфа?

### 2.3. Пористость торфа

Промежутки между частицами твердого вещества торфа называют порами. По формам и размерам поры могут быть самыми разнообразными. Суммарное (интегральное) содержание пор в объеме материала принято называть пористостью.

Пористость определяют как отношение объема пор, занятых водой и газом, ко всему объему:

$$n = \frac{V_B + V_G}{V_T} 100 \%, \text{ или } n = \frac{V_T + V_C}{V_T} 100 \%,$$

где  $V_B$  – объем воды;  $V_G$  – объем газа;  $V_T$  – объем образца торфа;  $V_C$  – объем твердого вещества торфа.

Пористость выражается как в процентах, так и в долях от единицы:

$$n = (V_B / V_T + V_G / V_T) 100 \% = n_B + n_G,$$

где  $n_B$  – влагонасыщенность (отношение объема пор, занятых водой, ко всему объему торфа);  $n_G$  – газонасыщенность (отношение объема пор, занятых газом, ко всему объему торфа).

Если выразить объем торфа через его массу и плотность, а также выразить объем сухого вещества, то пористость, %, можно рассчитать по формуле

$$n = 100 - \frac{\gamma}{\rho} (100 - w), \text{ или } n = 100 - \frac{100\gamma}{\rho(1 - W)},$$

где  $\gamma$  – плотность;  $\rho$  – плотность сухого беспористого вещества.

Значение влагонасыщенности, %, можно выразить через влажность и плотность:

$$n_B = \frac{\gamma}{\rho_B} w,$$

где  $\rho_B$  – плотность воды.

Находят значение газонасыщенности, %:

$$n_G = n - n_B = 100 - \frac{\gamma}{\rho} (100 - w) - \frac{\gamma}{\rho_B} w.$$

Интегральные характеристики  $n$ ,  $n_B$ ,  $n_G$  не дают представлений о состоянии пор в образце торфа. В действительности поры могут быть замк-

нутыми, тупиковыми и сообщающимися с внешним объемом. Например, в торфе различают *свободный* и *защемленный* газ. Первый легко удаляется при внешнем воздействии на торф, второй может быть удален только после разрушения ограничивающих стенок. При внешнем воздействии он сжимается, а при снятии давления расширяется, вызывая растрескивание материала, так как торф на разрыв работает хуже, чем на сжатие. Объем защемленного газа зависит от атмосферного давления и температуры. Температурные расширения газа вызывают пучение сырой массы. Таким образом, что в технологии производства кусковой продукции газовая фаза и ее состояние играют существенную роль и часто являются причиной брака и высокой крошимости.

Для характеристики состояния пор вводят понятие активной пористости  $n_a$ , под которой подразумевают отношение объема проводящих воду или газ пор ко всему объему материала. Активная пористость растет с увеличением степени разложения, дисперсности и уплотнения торфа. Например, в торфе степени разложения 10 % при общей пористости 94 % только 52 % пор (общего объема торфа) относятся к проводящим. Это связано с большим количеством неразрушенных клеток, в которых вода неподвижна.

При изменении объема пор пористость будет изменяться нелинейно, так как по определению переменными являются числитель и знаменатель. Поэтому введено еще одно понятие – коэффициент пористости  $e$ . Коэффициент пористости – отношение объема пор к объему сухого вещества:

$$e = V_{\text{пор}}/V_c.$$

Так как объем сухого вещества – величина постоянная, то зависит от объема пор линейно. Уравнение, связывающее плотность и влажность торфа с коэффициентом пористости, будет иметь вид

$$e = \frac{100 \rho}{\gamma(100 - w)} - 1.$$

Между пористостью и коэффициентом пористости существует зависимость

$$e = \frac{n}{100 - n}; n = \frac{e}{1 + e} 100 \%.$$

Пределы изменения пористости – от 0 до 100 %, коэффициента пористости – от 0 до  $\infty$ .

Экспериментальное определение пористости и коэффициента пористости чаще всего сводится к расчету этих величин по известным значениям влажности, плотности и истинной плотности твердой фазы. Непосредственное определение пористости (общей) затруднено, так как экспериментальные методы в большинстве своем основаны на замещении объема пор известным объемом жидкости или газа. В качестве замещающей жидкости применяют толуол, керосин или ртуть. Так как при замещении вытесняется

воздух, то этими методами фактически определяется газонасыщенность. Вытеснение воздуха может осуществляться как путем вакуумирования (керосин, толуол), так и путем задавливания жидкости при высоком давлении (ртутная порометрия). Зная массу вошедшей в образец жидкости или ее объем, рассчитывают пористость.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое поры?
2. Что такое пористость?
3. Что такое влагонасыщенность?
4. Что такое газонасыщенность?
5. Что такое активная пористость?
6. Что такое коэффициент пористости?

## **2.4. Капиллярное давление воды в торфе**

Торф относится к капиллярно-пористым телам. При заполнении капилляров водой поверхность жидкости искривляется. При этом появляется избыток свободной энергии, приводящий к так называемым капиллярным явлениям. Капиллярные явления обусловлены молекулярным давлением и пленочным натяжением в поверхностном слое жидкости. Молекулы жидкости, находясь на поверхности, испытывают притяжение нижележащих и соседних в горизонтальной плоскости молекул воды. Атмосфера как менее плотная среда оказывает гораздо меньшее притяжение. В силу этого равнодействующая сил притяжения будет отлична от нуля и направлена внутрь жидкости. Толщина пленки, в которой молекулярные силы не будут скомпенсированы, равна радиусу молекулярного действия. Радиус сферы молекулярного действия, измеренный по толщинам пленок мыльно-глицериновых пузырей, по данным различных авторов, колеблется в пределах  $52 \cdot 10^{-9}$ – $6,2 \cdot 10^{-9}$  м. Силы молекулярного притяжения в касательной плоскости слоя создают в нем натяжение и стремятся сократить поверхность слоя.

Капиллярные явления, вызванные поверхностным натяжением при смачивании или несмачивании стенок пор, называют капиллярным давлением. Это давление будет отрицательным в случае вогнутой поверхности и положительным в случае выпуклой, то есть жидкость будет либо втягиваться в капилляр (вогнутая поверхность), либо вдавливаться, и уровень ее будет ниже уровня жидкости в объеме (выпуклая поверхность). Эти закономерности получили математическое выражение в формуле Лапласа, которая в общем виде выглядит следующим образом:

$$P = P_{\mu} + \sigma(1/R_1 + 1/R_2),$$

где  $P$  – нормальное давление поверхностного слоя жидкости;  $P_{\mu}$  – молеку-

лярное давление на плоской поверхности;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны двух главных нормальных сечений [24]. Они считаются положительными, если направлены внутрь жидкости (выпуклый мениск), и отрицательными, если направлены в атмосферу (вогнутый мениск). Для простейшего случая цилиндрического капилляра при  $R_1 = R_2$  нормальное давление поверхностного слоя жидкости  $P = P_{\mu} + 2\sigma/R$ . Величина  $2\sigma/R$  и является капиллярным давлением.

Условились отбросить величину и оперировать отрицательными давлениями в воде, считая  $P_{\mu}$  под вогнутым мениском отрицательным. Отрицательное давление, введенное американским ученым в области механики грунтов К. Терцаги, понималось как растягивающее напряжение в воде под мениском [1]. В таком понимании в настоящее время и практикуется капиллярное давление. По формуле Лапласа для сферического мениска

$$P_{\kappa} = 2\sigma/R,$$

а для мениска, имеющего двойную кривизну:

$$P = \sigma(1/R_1 + 1/R_2).$$

Знак « $\rightarrow$ » также опускается, однако капиллярное давление отрицательно для вогнутого мениска и положительно для выпуклого.

Форма мениска определяется средством жидкости к смачивающей поверхности. Если жидкость смачивает поверхность, то мениск вогнутый, для несмачивающей жидкости – выпуклый. Применительно к торфу вода для стенок капилляров является смачивающей жидкостью. В процессе сушки и тем более термической обработки торфа характер смачивания меняется, что в большинстве случаев связано не с изменением природы поверхности, а с сорбированным воздухом, при удалении которого свойства поверхности восстанавливаются. Лишь специальные приемы позволяют изменить природу поверхности. По этой причине в торфе всегда имеем дело с отрицательным капиллярным давлением.

Если представить капилляр в виде цилиндрической трубки, то схему действия сил можно изобразить следующим образом (рис. 2.3): векторами  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{\text{г}}$  показаны силы, действующие на жидкость со стороны стенок; равные им реактивные силы  $\sigma'_{\text{в}}$  и  $\sigma'_{\text{г}}$  – действие жидкости на стенки капилляра.

Сила взаимодействия со стороны стенки капилляра на жидкость будет направлена по касательной к мениску в точке контакта со стенкой  $\sigma$ . Эту силу, отнесенную к единице длины смоченного периметра, можно разложить на вертикальную составляющую  $\sigma_{\text{в}}$  и горизонтальную  $\sigma_{\text{г}}$ , причем  $\sigma_{\text{в}} = \sigma \cos\theta$ . Равнодействующая вертикальных сил (сила капиллярного поднятия)  $F_{\kappa} = \sigma_{\text{в}} 2\pi r = 2\pi r \cos\theta$ .

Под действием этой силы жидкость поднимается до тех пор, пока равнодействующая  $F_{\kappa}$  не будет уравновешена столбом жидкости:

$$P_{\text{ж}} = \pi r^2 h \rho_{\text{в}} g,$$

где  $h$  – высота поднятия жидкости в капилляре;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды.

Высота поднятия жидкости в капилляре

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho_{\text{в}}g}.$$

Эта формула была впервые получена в 1718 г. Жюреном. Согласно формуле Жюрена высота поднятия зависит от сечения капилляра и может достигать значительных величин. Если длина капилляра меньше, чем наибольшая высота поднятия, то вода, достигнув верхнего края, изменит кривизну мениска таким образом, что капиллярное давление уравнивает столб поднятой жидкости, то есть угол смачивания увеличится и фактическое капиллярное поднятие станет равным длине капилляра. Произведение  $hr = a^2$  является физико-химической константой данной жидкости и не зависит от формы капилляра, размера трубки и материала, из которого она сделана [25]. Эта величина имеет размерность квадрата длины, обозначается и называется капиллярной постоянной

$$a^2 = 2\sigma/\rho_{\text{в}}g.$$

Для воды при  $t = 20$  °С на границе с воздухом  $\sigma = 72,7 - 10^{-3}$  Н/м (Дж/м<sup>2</sup>),  $a^2 = 14,9 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м (Дж/м<sup>2</sup>), с ростом температуры уменьшается по линейному закону, а для воды его можно рассчитать по эмпирической формуле [150]

$$\sigma = 75,7 (1 - 0,002 t) 10^{-3},$$

где  $t$  – температура, °С.

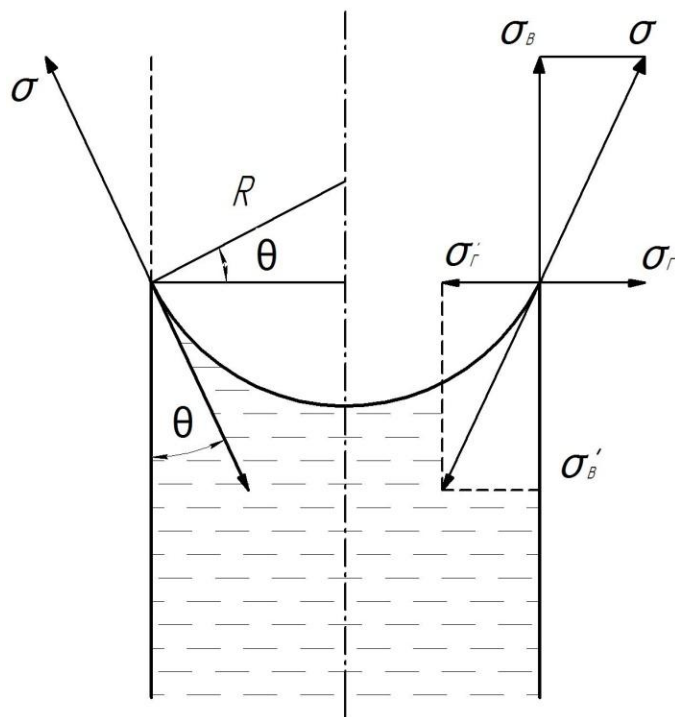


Рис. 2.3. Схема сил молекулярного взаимодействия между жидкостью и стенками капилляра



Таким образом, скелет грунта несет на себе в плоскости менисков нагрузку  $h\rho_{\text{вг}}$  совершенно так, как будто он нагружен в этой плоскости внешней нагрузкой  $P_{\text{к}}$ . Эта нагрузка полностью передается на скелет грунта и называется капиллярным давлением, что удобно для расчета как самого капиллярного давления в торфяной залежи, так и силы, действующей на залежь и ее уплотняющей. Благодаря этому определению капиллярное давление легко рассчитать по высоте поднятия воды от уровня грунтовых вод (УГВ). Так, например, если высота поднятия равна 0,5 м, то капиллярное давление –  $4,9 \cdot 10^3$  Па. Понижение УГВ будет как бы растягивать воду в капиллярах, увеличивая кривизну ( $1/R$ ) мениска и капиллярное давление. Максимальная кривизна мениска равна обратной величине радиуса капилляра. При дальнейшем понижении УГВ мениск больше не искривляется и капиллярная кайма будет отступать в глубь залежи. По данным Н.А. Наседкина, капиллярное давление в торфе находится в пределах  $1 \cdot 10^4$ – $6 \cdot 10^4$  Па [1]. Выше уровня менисков капиллярное давление на скелет торфа не действует.

Капиллярное давление является причиной усадки при сушке и осадки залежи при осушении. По мере сушки мениск из плоского при полном насыщении водой начинает искривляться. Появляются капиллярные давления тем большие, чем больше кривизна мениска. При этом максимальная кривизна, согласно схеме рис. 2.3, может быть равна  $1/r$ , где  $r$  – радиус капилляра. Если развивающиеся капиллярные силы привели к усадке образца, то выравнивающийся мениск «сбрасывает» их. В противном случае он начинает отступать в глубь материала. Часть материала над менисками находится вне действия капиллярных сил и может за счет упругости скелета торфа дать разуплотнение. Капиллярные силы действуют и между отдельными частицами, определяя их связность. На рис. 2.4 приведена схема, поясняющая появление сил сцепления между частицами торфа. Эта так называемая манжетная влага удерживает частицы относительно друг друга, и напряжение, необходимое для их разъединения, принято называть капиллярным сцеплением, или связностью. Если предположить, что частицы размера  $D$  уложены по закону кубической симметрии, то проекция сечения будет иметь площадь  $D^2$ . Отношение капиллярной силы, действующей между частицами  $F_{\text{к}}$ , к площади сечения  $D^2$  есть капиллярное сцепление (связность), определяемое по формуле [1, 26]

$$C_{\text{к}} = F_{\text{к}} / D^2.$$

Капиллярная сила

$$F_{\text{к}} = (-P_{\text{к}}) \pi r_1^2,$$

где  $P_{\text{к}}$  – капиллярное давление воды, взятое с обратным знаком, так как оно отрицательно;  $\pi$  – площадь сечения водной прослойки, стягивающей частицы.

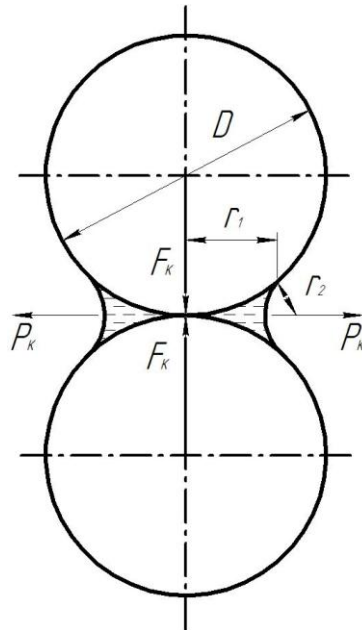


Рис. 2.4. Схема действия капиллярных сил между сферическими частицами

Расчет поднятия воды по цилиндрическим капиллярам дает при уменьшении радиуса сколь угодно большую высоту поднятия, исчисляемую сотнями метров. В действительности подобного поднятия не наблюдается по причине отсутствия в природе идеальных цилиндрических капилляров. Отличие реальной формы капилляров от цилиндрической приводит к тому, что расчетные значения эффективных радиусов капилляров, определенных методом свободного всасывания (поднятия) воды образцом грунта и стекания воды из полностью насыщенного образца, различны. В первом случае капиллярная кайма расположена на меньшей высоте от УГВ, чем во втором. Поэтому радиус капилляров для первого случая будет больше. Это несоответствие объясняется схемой (рис. 2.5).

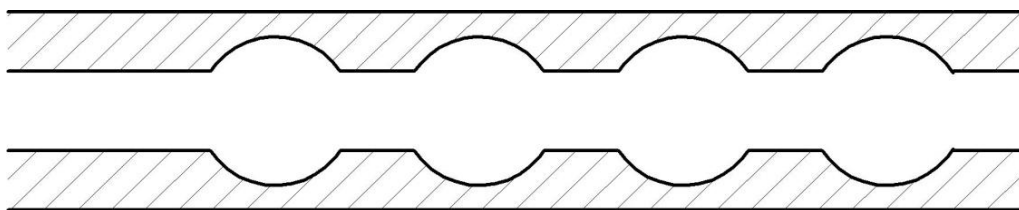


Рис. 2.5. Схема жаменовской цепочки

Французским ученым Ж. Жаменом был предложен капилляр, состоящий из шариков, соединенных цилиндрическими или овальными участками. Капилляр такого типа получил название жаменовской цепочки [1]. Иногда его называют четочным капилляром. В таком капилляре поднятие воды будет определяться самым большим диаметром. При опуска-

нии жидкости решающее влияние будет оказывать самый малый размер капилляра на пути отступления мениска.

Вполне очевидно, что торфяные системы не могут быть отождествлены с модельными системами, состоящими из цилиндрических, четочных, щелевидных и других непрерывных капилляров. Однако физические явления, обусловленные поверхностным натяжением, существуют, и их, естественно, легче описать и пояснить на идеальных моделях. В частности, такой моделью, как конический капилляр, легко объяснить самопроизвольный подток воды в зону испарения при сушке торфа.

На рис. 2.6 представлены различные формы капиллярной воды. Движение жидкости в коническом капилляре поясним особо (рис. 2.6б). Из формулы Лапласа следует, что капиллярное давление будет тем больше (по абсолютной величине), чем меньше радиус мениска.

Следовательно, капиллярное давление под более кривым мениском в узкой части капилляра будет больше, чем в широкой его части. Под избытком давления вода начнет перемещаться в более узкую часть, пока кривизна мениска не уменьшится настолько, чтобы уравнять разницу в давлениях.

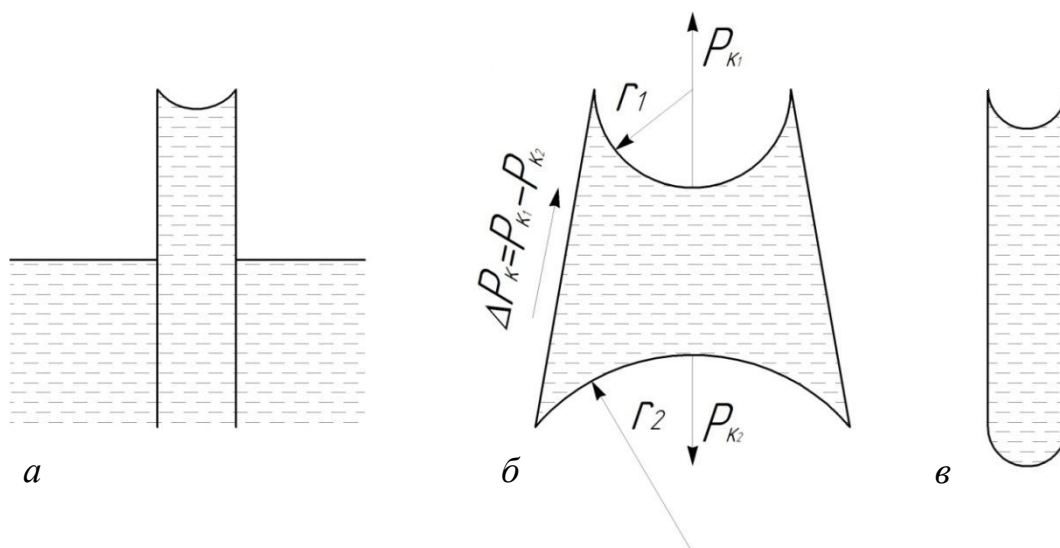


Рис. 2.6. Различные формы капиллярной влаги: капиллярно «подпертая» (а); капиллярно «подвешенная» (б); капиллярно «посаженная» на нижний мениск (в)

Для описания закономерностей передвижения воды было введено (Э. Букингом в 1907 г.) понятие капиллярного потенциала [24]:

$$\psi_{\text{к}} = P_{\text{к}} / \rho_{\text{ж}} = hg.$$

Капиллярный потенциал имеет размерность  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$  (или, умножив и разделив на килограмм, получим размерность Дж/кг). Это позволит определить потенциал как работу, необходимую для перемещения единицы массы жидкости. В состоянии равновесия капиллярный потенциал в любой точке равен потенциалу тяжести. При соприкосновении смоченных слоев

с разными потенциалами жидкость начинает двигаться в сторону большего капиллярного потенциала (для отрицательных капиллярных давлений). Движение влаги в почве под действием капиллярного потенциала по Букингему описывается уравнением

$$i = \lambda \Delta (\psi_k - \varphi) = \lambda \Delta \varphi,$$

где  $i$  – капиллярный поток влаги,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент капиллярной проводимости по Букингему,  $\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Н}^{-1}$ ;  $\Delta (\psi_k - )$  – градиент капиллярного потенциала с учетом гравитационного поля,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{м} = \text{Н}/\text{кг}$ .

В зависимости от направления капиллярного потока  $\varphi$  имеет знак «+» при движении вниз и «-» при перемещении вверх.

Капиллярное давление (капиллярный потенциал) можно определить несколькими методами. Метод Терцаги [1] основан на снятии компрессионной кривой (кривой уплотнения материала). Необходимо по компрессионной кривой определить давление, соответствующее этой влажности ( $P$ ), и рассчитать капиллярное давление по формуле

$$P_k = \frac{1 + 2\xi}{3} w,$$

где  $\xi$  - коэффициент бокового давления при данной влажности  $w$ .

#### **Метод микротензиометра [27]**

Микротензиометр представляет собой запаянный с одного конца капилляр длиной 30–50 мм и диаметром 0,5–3,0 мкм. При погружении открытого конца в воду под действием капиллярного давления вода заполняет капилляр до тех пор, пока капиллярное давление не уравновесится давлением воздуха  $P^0$  (рис. 2.7а).

Радиус капилляра при тарировке микротензиометра:

$$r = \frac{2\sigma}{P_0(l/l_0 - 1)}.$$

Поместив капилляр в кусок торфа, можно измерить то давление, которое развивается в слоях жидкости, прилегающей к устью капилляра. Схема действия сил мениска приведена на рис. 2.7б. Воздух давит на мениск с силой  $P^x$ ; длина воздушного столбика для этого случая пусть будет  $l_x$ . Если в сушеном материале капиллярное давление ( $P$ ) больше, то, будучи отрицательным, оно «высасывает» воду из капилляра.

Техника измерения капиллярного давления с помощью тензиометра заключается в следующем. Капилляр вставляется в образец малого размера. Образец периодически взвешивают и определяют по убыли веса его влажность.

По микроскопу ведут отсчет длины столбика воздуха  $l_x$ . Далее расчет ведут по уравнению

$$P = P_0 l \left[ \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_x} \right].$$

Построив график в координатах  $P^x$  от влагосодержания, можно определить давления в системе при соответствующей влажности. Поскольку потенциал мало меняется при больших влагосодержаниях, то его измеряют с помощью капилляров большого диаметра (2–3 мкм). Это использовал А.Е. Афанасьев для измерения давлений и структурных характеристик (диаметра пор) в сохнувших частицах фрезерного торфа [27].

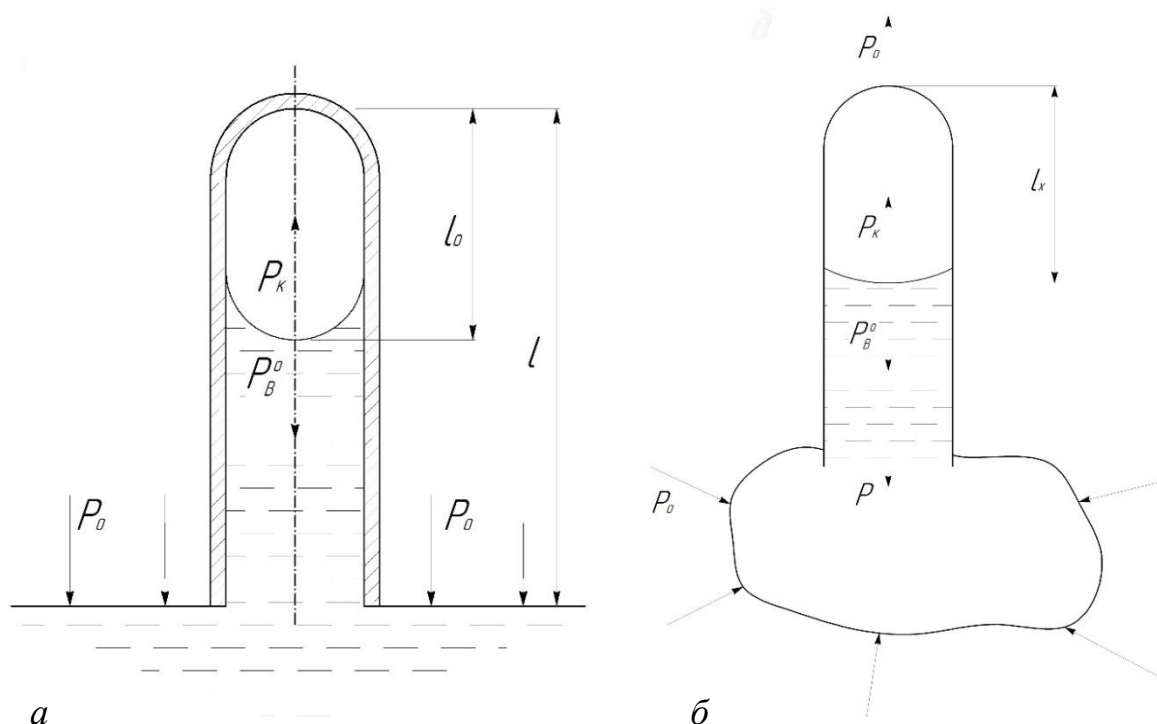


Рис. 2.7. Схема микротензиометра для определения капиллярного давления в торфе: тарировка капилляра (а); силы, действующие на мениск при сушке (б);  $P_k$  – капиллярные силы,  $P_0$  – атмосферное давление

### Метод датчиков Корчунова [28]

С.С. Корчуновым в научную практику исследований по торфу было введено понятие потенциалов влаги и подробно разработано различные конструкции датчиков, которые нашли применение не только в торфяной практике. Схема датчика влагопотенциометра и вычисления величины потенциала влаги представлена на рис. 2.8.

Датчик представляет собой коническую трубку из пористой керамики с наиболее крупными диаметрами пор 3,0–3,5 мкм. Большая поверхность пористого датчика обеспечивает лучший контакт с торфом. В отличие от рассмотренного выше микротензиометра, в этом случае получаемый результат дает среднюю величину капиллярного давления и данные параллельных измерений лучше совпадают. Потенциал в данной точке, данной поре измеряется микротензиометром локально и зависит от контакта с водной пленкой. Датчик соединяется гибкой трубкой из прозрачного пластика, чтобы имелась возможность просматривать наличие воздуха в изме-

рительной системе. Ртутный манометр должен обладать большой жесткостью, чтобы при измерении потенциала в системе количество вытекающей из датчика воды было невелико (во избежание изменения влажности вокруг датчика). Система «датчик – гибкая трубка – манометр» заполняется водой так, чтобы избежать попадания воздуха. До использования датчик хранится в воде. Капиллярное давление в этом случае равно нулю, и в манометре ртуть находится на одном уровне (нулевом).

С введением датчика в торф, находящийся в ненасыщенном состоянии, начинается переток воды из датчика до тех пор, пока не наступит равновесное состояние (рис. 2.8б).

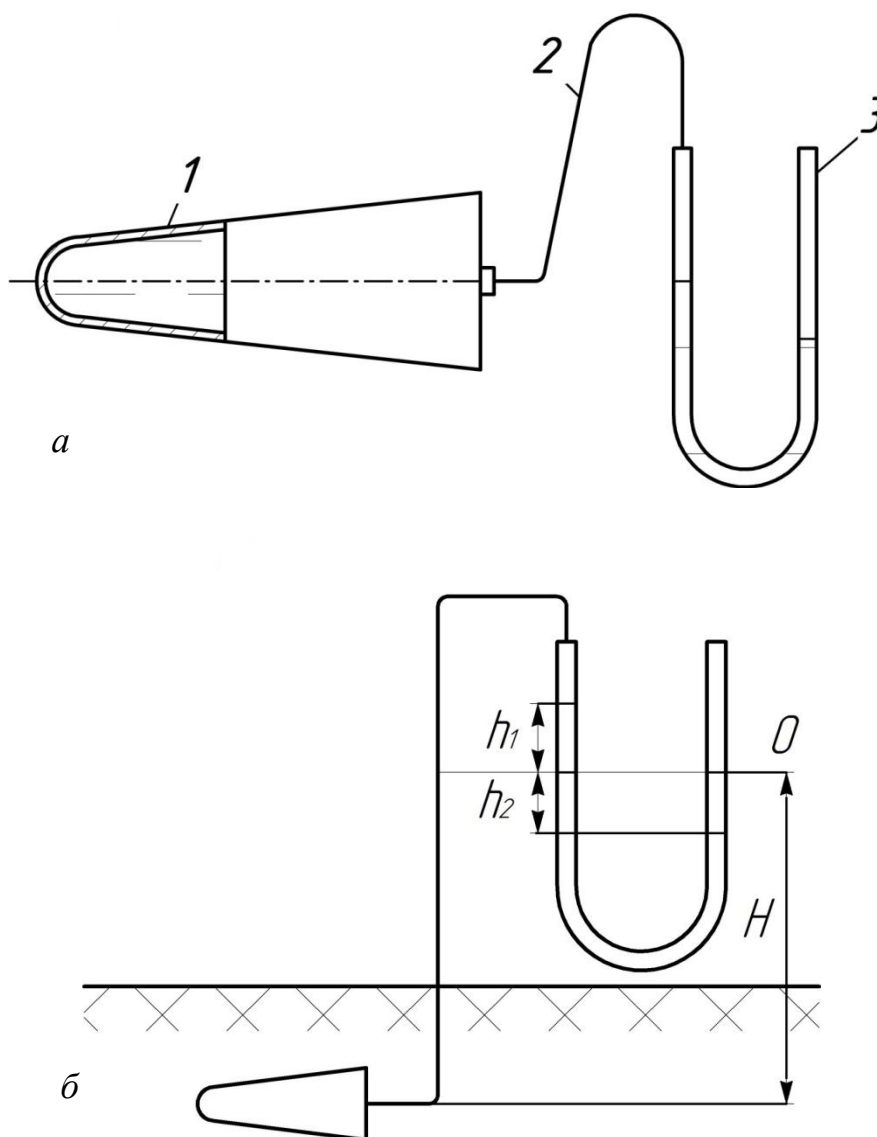


Рис. 2.8. Схемы влагопотенциометра (а) и вычисления потенциала влаги (б): 1 – керамический датчик; 2 – гибкая соединительная трубка; 3 – ртутный манометр  
Датчиком при помещении его в залежь измеряется общий потенциал

влаги, слагающийся из потенциалов «капиллярного» и «положения». В почвоведении принято выражать «сосущую» способность почвы величиной капиллярного напора  $h = \psi_k/g$ . Логарифм этой величины (в см) по Скофилду [1, 29] обозначается символом рF (по аналогии с рН):

$$pF = \lg h.$$

Кривые рF от влажности называют влажностными кривыми, они показывают, сколько влаги удерживается почвой при данном напоре (давлении). Датчики, в которых рабочей частью является керамическая оболочка (мембрана), могут иметь различные формы и размеры.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите причины капиллярного явления.
2. Что такое капиллярное давление?
3. Что такое капиллярная постоянная?
4. Перечислите методы определения капиллярного давления.
5. Изложите сущность метода микротензиометра.
6. Изложите сущность метода датчиков Корчунова.

## **2.5. Водопоглощаемость и полная влагоемкость торфа**

Водопоглощаемость (водопоглощение) – способность торфа поглощать и удерживать воду. С водопоглощением приходится непрерывно сталкиваться в процессе добычи и хранения торфа. Причем если для такой продукции, как топливный фрезерный и кусковой торф, брикеты, изоляционные плиты, это явление нежелательно, то для торфа, используемого на удобрения, подстилку, в качестве тепличных грунтов, наоборот, важно сохранить высокие поглотительные свойства.

Численно водопоглощение определяется как отношение поглощенной воды к начальной массе торфа и выражается в процентах. Зависит оно от времени поглощения и находится по формуле

$$B_{\tau}^w = \frac{m_{\tau} - m_{\text{н}}}{m_{\text{н}}},$$

где  $B_{\tau}^w$  – водопоглощение торфа при влажности  $w$  за время  $\tau$ , ч;  $m_{\tau}$  – масса торфа, кг, после увлажнения в течение времени  $\tau$ , ч;  $m_{\text{н}}$  – начальная масса торфа, кг, при натуральной влажности.

Максимальную водопоглощаемость торфа принято определять при намокании его в течение 48 ч. В действительности водопоглощение может протекать и более длительное время. Определение величины  $B_w$  представляет интерес при оценке свойств данной продукции при натуральной влажности, так как сразу показывает то возможное количество воды, которое может быть поглощено торфом. Однако чем больше на-

чальная влажность, тем меньше поглощается воды [16].

Влажностью торфа называется выраженное в процентах отношение массы воды, содержащейся в торфе, к массе всего торфа.

В естественном состоянии торф отличается большой влажностью. Для технических расчетов пользуются значением относительной влажности торфа. Она определяется как процентное отношение веса воды, находящейся в торфе, к его общему весу.

Меньшей влажностью обладает торф древесной группы, большей – моховой. Особенно высокую влажность имеет торф с большим содержанием сфагновых мхов. Это относится и к низинному, и к переходному, и к верховому типам торфа (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Средние значения относительной влажности  
для групп и типов торфа, %

Группа торфа	Среднее значение влажности торфа		
	низинного типа	переходного типа	верхового типа
Древесная	86,7	88,9	90,6
Древесно-травяная	88,7	89,5	90,7
Древесно-моховая	89,4	90,1	92,4
Травяная	90,2	90,5	92,2
Травяно-моховая	90,7	90,7	92,2
Моховая	90,3	90,6	92,7
Среднее	89,4	90,5	91,2

Согласно данным табл. 2.4, влажность в пределах типов плавно увеличивается от древесных к моховым группам, причем влажность торфа моховой группы низинного типа находится на уровне влажности древесной группы переходного типа, а влажность торфа моховой группы переходного типа – на уровне влажности древесной группы верхового типа, образуя один непрерывный возрастающий ряд.

В торфе низинного типа максимальной влажностью (в среднем по виду) отличается шейхцериевый (90,8 %) и осоково-гипновый (90,9 %) виды, а минимальной – древесный (86,7 %). В торфе переходного типа максимальная влажность у шейхцериевого и сфагнового видов (90,7 %), а минимальная – у древесного (88,9 %). У торфа верхового типа наибольшая влажность у фускум-торфа (93,2 %), наименьшая – у соснового (90,6 %).

Влажность торфа в залежи – один из неустойчивых показателей его свойств. Она может значительно изменяться в зависимости от температурного и водного режимов, района расположения торфяного месторождения и больше, чем другие показатели, подвержена воздействию вторичных



процессов (например, обводнению или мелиорации прилегающих территорий, влиянию залесенности и т. д).

Естественная влажность – относительная влажность торфа в неосушенной торфяной залежи.

Эксплуатационная влажность – нормативная влажность торфа в верхнем слое торфяной залежи после проведения эксплуатационного осушения (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Эксплуатационная влажность торфяной залежи

Вид продукции	Год эксплуатации			
	1, 2-й		3-й и последующие	
	$h_{\phi}$ , м	$w_{э}$ , %	$h_{\phi}$ , м	$w_{э}$ , %
Топливо и сырье для брикетов для залежи: низинной и верховой, переходной и смешанной	0,011	78	0,011	75
	0,011	82	0,011	79
Торф повышенной влажности для залежи: низинной и верховой, переходной и смешанной	0,015–0,016	78	0,015–0,016	75
	0,015–0,016	82	0,015–0,016	79
Торф для подстилки	0,015–0,020	84	0,015–0,020	81

Примечание. Для предприятий, расположенных в Украине, Омской и Новосибирской областях, глубина фрезерования принимается равной 0,012 м.

Условная влажность – влажность, принимаемая при расчетах производителя с потребителями: для кускового торфа  $w_v = 33\%$ , для топливного торфа  $w_v = 40\%$ , для фрезерного торфа для сельскохозяйственного использования  $w_v = 55\%$ .

Равновесная влажность – влажность, при которой парциальное давление водяного пара у поверхности торфа равно парциальному давлению водяного пара в воздухе. Если парциальное давление водяного пара у по-

верхности торфа больше давления водяного пара в воздухе, то влага испаряется из торфа. Если наоборот, то торф поглощает влагу.

Полная влагоемкость – максимальное количество воды, которое торф может удерживать за счет всех форм связи. Она определяется как отношение количества воды в торфе к массе сухого торфа и является влагосодержанием. Полная влагоемкость обозначается  $W_p$ , а влагоемкость за время  $\tau$  –  $W_\tau$ .

Полная влагоемкость торфа определяется следующим образом. Берется воронка с сетчатым дном (воронка Бюхнера). Дно ее покрывается фильтровальной бумагой. В воронку выливается смешанный с водой торф (рис. 2.9).

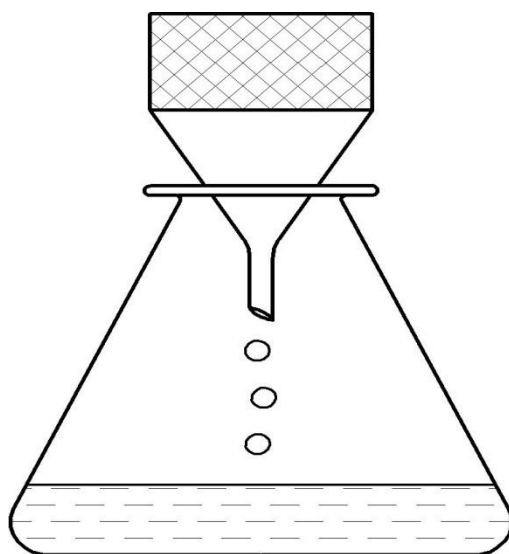


Рис. 2.9. Схема определения полной влагоемкости

Выдержка торфа в воде должна соответствовать окончанию процесса поглощения. Вода из торфа, вылитого в воронку, будет отфильтровываться. Опыт ведется до прекращения фильтрации. Чтобы не было испарения, воронка прикрывается стеклом. Влагосодержание торфа после окончания фильтрации и есть полная влагоемкость. Величина ее зависит от условий проведения опыта, и в частности, от высоты слоя торфа. С этой целью высота слоя торфа должна быть принята постоянной. Рекомендуется ее принимать 30 мм.

Для определения водопоглощения образцы торфа (взвешенные и известной влажности) помещаются в цилиндры с сетчатым дном или марлевые мешочки. После пребывания торфа в воде ей дают свободно стечь и взвешиванием определяют количество впитанной воды. Водопоглощение зависит от времени и температуры воды, поэтому для сопоставления результатов опыты следует вести при одной температуре [30]. Кроме этих факторов на  $W$  и  $B$  оказывают влияние физические свойства самого торфа.

На полную влагоемкость влияют ботанический состав, характеризующийся способностью растительных остатков к набуханию, а также степень разложения, дисперсность, химический состав, иссушение и промерзание торфа [10, 55, 31].

Наибольшей влагоемкостью обладают верховые сфагновые виды торфа. Хранение такого торфа, сопровождающееся разогреванием, приводит к значительной потере влагоемкости [30]. Влагоемкость также уменьшается при хранении, не сопровождающемся разогреванием, что связано с необратимыми процессами в клетках при их длительном иссушении (старение). У торфов высокой и средней степени разложения при влажностях ниже 50–40 % возникает необратимость свойств, влагоемкость не достигает своих первоначальных значений, и это отклонение становится тем сильнее, чем ниже влажность.

В общем случае поглощение жидкости или ее паров полимерами называют набуханием. При этом низкомолекулярная жидкость, проникая внутрь структур, раздвигает макромолекулы и вызывает их макроструктурное набухание [32]. Таким образом, набухание сопровождается увеличением массы, объема и изменением структуры вещества.

Различают ограниченное и неограниченное набухание. Неограниченное набухание – растворение. Процесс этот идет самопроизвольно за счет диффузии полимера в растворитель. Ограниченное набухание – процесс, ограниченный поглощением низкомолекулярной жидкости полимером, при котором самопроизвольного растворения и отделения цепей полимера друг от друга не происходит. Однако в случае ограниченного набухания отдельные части полимера могут растворяться с выносом их в растворитель. При этом предельная величина набухания уменьшается. Схематично эти случаи представлены на рис. 2.10 [32].

Аналитически скорость водопоглощения можно представить уравнением

$$\frac{dB_{\tau}}{d\tau} = K(B_{\max} - B_{\tau}),$$

где  $B_{\max}$  – максимальное значение водопоглощения;  $B_{\tau}$  – значение водопоглощения ко времени  $\tau$ ;  $K$  – константа, характеризующая скорость поглощения и зависящая от природы торфа и температуры воды.

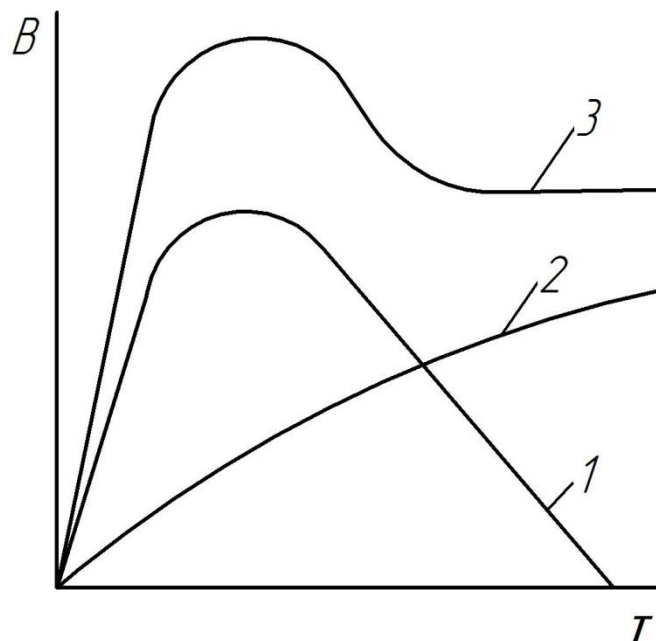


Рис. 2.10. Типы кинетики кривых набухания:  
1 – неограниченное; 2 – ограниченное; 3 – ограниченное с частичным растворением отдельных фракций

### Контрольные вопросы

1. Что такое водопоглощение?
2. Что такое влажность?
3. Перечислите виды влажности торфа.
4. Что такое полная влагоемкость?
5. Расскажите, как определить полную влагоемкость.
6. Какие бывают типы кинетики кривых набухания?

## 2.6. Теплота сгорания торфа

Теплота сгорания  $Q$  – это количество тепла, выделившееся при полном сгорании единицы массы топлива, Дж/кг. Теплоплотность  $Q_\gamma$  – теплота сгорания единицы объема топлива, Дж/м<sup>3</sup>. Теплоплотность характеризует тепловую ценность сравниваемых топлив. Между  $Q$  и  $Q_\gamma$  существует связь  $Q_\gamma = Q \gamma$ , где  $\gamma$  – насыпная плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоту сгорания определяют в калориметрической установке (рис. 2.11), которая состоит из калориметра и калориметрической бомбы. Калориметр заполнен водой, температуру которой при непрерывном перемешивании определяют с точностью до 0,1 градуса. Обычно калориметр тарируется, то есть определяется то количество теплоты, которое необходимо подвести, чтобы всю систему калориметра (оболочка, бомба, вода, термометр и мешалка) нагреть на 1 градус. Это так называемое водное число определяется по известной теплоте.

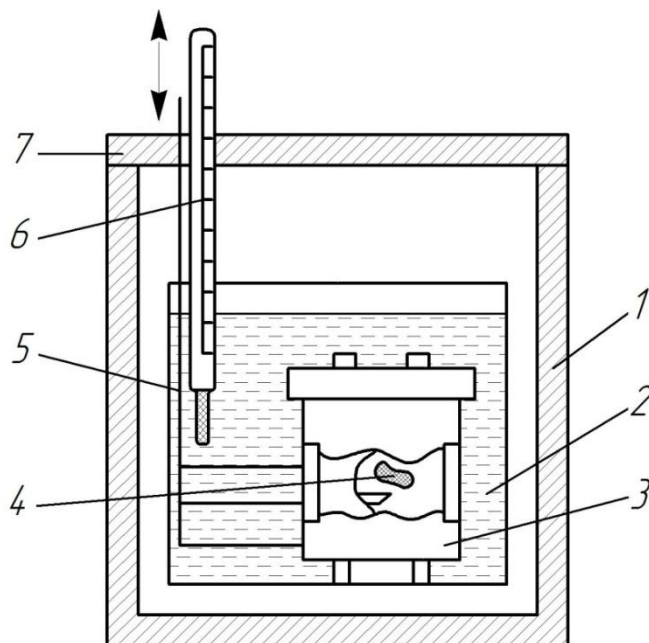


Рис. 2.11. Схема калориметрической установки:  
 1 – теплоизоляционный кожух; 2 – стакан калориметра;  
 3 – калориметрическая бомба; 4 – брикетик торфа; 5 – мешалка;  
 6 – термометр; 7 – крышка

Бомба представляет собой толстостенный стальной сосуд, в который помещается навеска сжигаемого топлива и закачивается под давлением 2,0–2,5 МПа кислород. Для сжигания торф измельчают до крупности  $< 0,25$  мм, берут навеску 1–1,5 г и вместе с запальной проволокой прессуют в брикетик, который с помощью запальной проволоки подвешивается над чашечкой к электродам. Бомба устанавливается в калориметр, электроды подсоединяются к источнику электрического тока, включается мешалка. Отсчет температуры берут по термометру Бекмана. Скачок температуры  $\Delta t$  определяют графически. По этому методу в кривой хода температур выделяют три периода (рис. 2.12):

1) начальный *AB* – от начала наблюдения до момента зажигания пробы, этот участок учитывает теплообмен калориметра с окружающей средой; температура здесь обычно повышается незначительно;

2) главный *BC*, продолжающийся от момента включения электрического тока и поджигания пробы до полного сгорания топлива и передачи всего тепла нагреваемой воде;

3) конечный *CD*, на котором идет теплообмен калориметра с окружающей средой с понижением температуры.

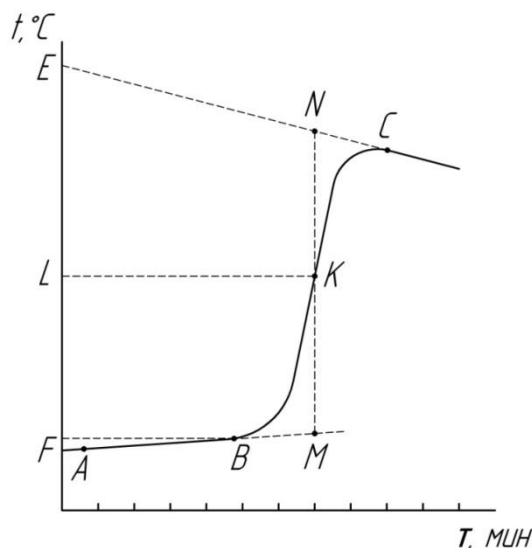


Рис. 2.12. График изменения температуры во времени

По графику определяют разность между максимальной температурой после сжигания и температурой в начале опыта с учетом внешнего теплообмена. Для этого продолжают участки  $AB$  и  $CD$  до пересечения с осью ординат. Отрезок  $EF$  делят пополам и через точку  $L$  проводят прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с прямой  $BC$  главного периода. Через точку  $K$  проводят вертикальную прямую до пересечения с продолжением прямых  $CD$  и  $AB$ . Отрезок  $MN$  представляет собой разность температур  $\Delta t$ . Расчет теплоты сгорания, отнесенной к массе аналитической навески, ведут по уравнению

$$Q_6^a = \frac{H\Delta t - qb}{m_a}, \quad (2.1)$$

где  $H$  – водное число калориметра;  $q$  – теплота сгорания запальной проволоки;  $b$  – масса сгоревшей части проволоки;  $m_a$  – масса аналитической навески торфа. Величину  $H$ , если она неизвестна, можно ориентировочно определить по уравнению  $H = MC$ , где  $M$  – масса воды в калориметре;  $C$  – удельная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/кг·град. Определенную по уравнению (2.1) величину называют теплотой сгорания по бомбе. Ее можно рассчитать на сухое вещество или горючую навеску по формулам

$$Q_6^c = \frac{Q_6^a \cdot 100}{100 - w^a}; \quad Q_6^r = \frac{Q_6^a \cdot 100}{100 - w^a - A^a},$$

где  $w^a$  – влажность аналитической пробы, %;  $A^a$  – зольность аналитической пробы (пробы с некоторым содержанием воды), %.

Количество тепла, образующееся в бомбе при сгорании навески, всегда больше того, что выделяется в топке, поскольку в бомбе дополнительно выделяется тепло за счет кислотообразования и конденсации паров воды.

Высшая теплота сгорания – теплота сгорания топлива в бомбе за вычетом теплоты кислотообразования. При сгорании серы, входящей в топливо, образуется газ  $SO_2$ , который в бомбе окисляется до  $SO_3$ . Серный ангидрид, растворяясь в воде, образует серную кислоту с выделением тепла:  $SO_2 + 1/2O_2 + H_2O = H_2SO_4 + 300 \text{ кДж/моль}$ . В расчете на 1 кг серы тепловыделение составит  $300 \cdot 10^3/32 = 9\,400 \text{ кДж}$ , то есть на 1 % содержания серы в аналитической навеске тепловыделение равно  $94 S^a \text{ кДж}$  (здесь  $S^a$  в %). В бомбе происходит частичное окисление азота с образованием азотной кислоты. При этом принято допущение: чем выше температура сгорания топлива, тем больше образуется  $HNO_3$ . Поэтому дополнительное тепловыделение считают пропорциональным  $Q_6^a$ . Коэффициент пропорциональности равен 0,001 для каменных углей и антрацита и 0,0015 для бурых углей, сланцев и торфа. Для сланцев с теплотой сгорания по бомбе ниже  $5\,500 \text{ кДж/кг}$  необходимо учесть тепловыделение от разложения карбонатов. На каждый процент оставшейся в зольном остатке двуокиси углерода от неразложившихся карбонатов  $[CO_2^a]_k$  (зола топлива в бомбе) дополнительный эффект тепловыделения составляет  $40 \text{ кДж}$ . Таким образом, высшая теплота сгорания торфа,  $\text{кДж/кг}$ , находится по формуле [33]

$$Q_B^a = Q_6^a - 94S^a - 0,0015 Q_6^a;$$

для сланцев с теплотой сгорания  $< 5\,500 \text{ кДж/кг}$  [33]

$$Q_B^a = Q_6^a - 94S^a - 0,0015 Q_6^a - 40[CO_2^a]_k.$$

В расчете на рабочее топливо высшая теплота сгорания

$$Q_B^p = \frac{Q_B^a \cdot (100 - w^p)}{100 - w^a},$$

где  $w^p$  – влажность рабочего топлива. Значения  $Q_B^r$  и  $Q_B^c$  находятся по формулам

$$Q_B^r = \frac{Q_B^a \cdot 100}{100 - w^a - A^a}; \quad Q_B^c = \frac{Q_B^a \cdot 100}{100 - w^a}.$$

Низшая теплота сгорания – теплота сгорания, которая реализуется в топке, она меньше высшей теплоты па величину тепловыделения при конденсации паров воды ( $Q_{H_2O}$ ). Общее количество паров воды при сгорании 1 кг топлива равно количеству воды, находящейся в топливе ( $w/100$ ) и образуемой при сжигании водорода топлива ( $9H/100$ ), так как из 1 кг водорода образуется 9 кг воды.

Удельную теплоту конденсации водяного пара принимают равной  $2\,500 \text{ кДж/кг}$ , или, в расчете на 1 % образовавшейся воды, –  $25 \text{ кДж}$ . Отсюда низшая теплота сгорания,  $\text{кДж/кг}$ , определяется по формуле

$$Q_H^a = Q_B^a - 25(9H^a + w^a),$$

где  $H^a$  – содержание водорода в аналитической навеске, которое рассчитыва-

ется по известному содержанию водорода в горючей навеске ( $H^f$ ) по формуле

$$H^a = \frac{H^f (100 - w^a - A^a)}{100}.$$

Содержание  $H^f$  в торфе принимается равным 6 %. Низшие теплоты сгорания рабочего топлива, сухой навески и горючего вещества рассчитываются по формулам:

$$Q_H^p = Q_B^p - 25(w^p + 9H^p); \quad Q_H^c = Q_B^c - 225H^c;$$

$$Q_H^f = Q_B^f - 225H^f.$$

Кроме прямого определения теплоты сгорания, существуют косвенные методы, основанные на определении теплоты по элементному составу, по уравнениям регрессии между характеристиками топлива и теплотой сгорания.

Из многочисленных уравнений, позволяющих определить теплоту сгорания по элементному составу, в нашей стране наибольшее применение получила формула Д.И. Менделеева. Для высшей теплоты сгорания она имеет вид

$$Q_B = 339 C + 1258H - 109 (O - S).$$

Г.Ф. Кнорре была предложена формула для определения высшей теплоты сгорания различных топлив [33]:

$$Q_B = \alpha C + \beta H + \gamma O. \quad (2.2)$$

Числовые коэффициенты, входящие в эту формулу (в кДж/(кг·%)), для разных топлив представлены в табл. 2.6. Формула (2.2) может быть отнесена к любой из масс топлива.

Таблица 2.6

Коэффициенты уравнения (2.2)

Топливо	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Древесина	388	1 160	145
Торф	372	1 120	139
Бурый уголь	364	1 090	137
Каменный уголь	358	1 070	134
Антрацит	352	1 050	132
Мазут	372	1 120	139

Расчетные формулы второй группы косвенных методов основаны на анализе статических связей теплоты сгорания со степенью разложения и зольностью. Для верхового торфа с коэффициентом корреляции 0,86 [15]

$$Q_6^f = 20\,400 + 89,5R.$$



Для высшей теплоты сгорания на сухое вещество удовлетворительные результаты дают формулы [26, 194]:

низинный торф:

$$Q_{\text{в}}^{\text{с}} = 23\,000 - 230 A^{\text{с}};$$

верховой торф:

$$Q_{\text{в}}^{\text{с}} = 19\,500 - 260 A^{\text{с}} + 65 R.$$

В целом для типов торфа средние значения теплоты сгорания, МДж/кг, следующие: низинный и переходный – 23,3, верховой – 22,5 [1]. Для групп торфа значения  $Q_{\text{б}}^{\text{Г}}$  приведены в прил. 1. Следует отметить, что значения  $Q_{\text{б}}^{\text{Г}} < 20,9$  МДж/кг свойственны верховым видам торфа. Увеличение степени, разложения для верховых и переходных торфов сопровождается ростом  $Q_{\text{б}}^{\text{Г}}$ , для низинных это нехарактерно. Торф, содержащий большое количество битумов, гуминовых кислот и негидролизуемого остатка, имеет высокую теплоту сгорания. При высоком содержании целлюлозы и легкогидролизуемых веществ  $Q_{\text{б}}^{\text{Г}}$  невысока.

Для удобства расчетов топливно-энергетических балансов, представленных различными топливами, используют понятия об условном топливе. Условным топливом называется универсальный энергозамениватель с низшей рабочей теплотой сгорания 29 330 кДж/кг. Реально такой теплоте сгорания соответствует каменный уголь.

Для пересчета натурального топлива в условное вводят понятие теплового эквивалента, представляющего собой отношение низшей рабочей теплоты сгорания данного топлива к теплоте сгорания условного топлива:

$$\mathcal{E} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} / 29\,330.$$

Перевод массы натурального топлива в условное осуществляется по формуле

$$m_{\text{усл}} = m_{\text{нат}} \mathcal{E}.$$

Для различных топлив значение  $\mathcal{E}$  равно: каменный уголь – 0,86; бурый уголь – 0,42; торф фрезерный – 0,39; кусковой – 0,43; брикет торфяной – 0,58; кокс торфяной – 1,04; нефть – 1,21; бензин – 1,6 (табл. 2.7).

Таблица 2.7

## Основные характеристики минеральных топлив

Показатели	Дрова	Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит	Нефть	Газ	Сланцы
Содержание влаги в свежедобытом	60	75–80	30–50	4–15	2–4	–	–	–
Влажность воздушно-сухого вещества, %	20–25	40	8	5	4	–	–	12–17
Зольность $A^L$	1	3–15	10–25	10–35	10–20	–	–	45–62
$Q_G^r$ , МДж/кг	18,9	23,0	28,1	29,3	33,5–35,6	–	–	29,3–37,4
$Q_H^p$ , МДж/кг	10,0	8,5	6,3–18	16,7–29,3	33,5	35,6	40,0	5,4–11,3

**Контрольные вопросы**

1. Что такое теплота сгорания?
2. Как определить теплоту сгорания?
3. Расскажите о калориметрической установке.
4. Что такое высшая теплота сгорания?
5. Что такое низшая теплота сгорания?
6. Как найти низшую теплоту сгорания?
7. Какой вид топлива имеет наибольшую теплоту сгорания?

### 3. СЕЛЕКТИВНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ БИТУМНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ИХ ПЕРЕРАБОТКА

#### 3.1. Теоретические основы получения битумов из торфа

Отличительной особенностью ряда бурых углей и торфа является наличие в этих горючих ископаемых значительных количеств веществ, извлекаемых органическими растворителями, которые называются битумами. Продукты, экстрагируемые из топлива органическими растворителями, отличаются друг от друга по своему химическому составу и физическим свойствам.

Битумы представляют гидрофобную составляющую торфа и могут в нем присутствовать как в свободном, так и в связанном с другими группами веществ состоянии.

По современным представлениям битумы – олеофильная дисперсная система [34]. Элементарной структурной единицей битума является мицелла, состоящая из конденсированного асфальтенового ядра со стабилизирующей пленкой смол. Дисперсионной средой в битумах служат масла. Смолы придают битуму вязкость и пластичность. Молекулярная масса их по мере удаления от асфальтенового ядра уменьшается и в пределе приближается к маслам. Четкой границы раздела между мицеллой и средой нет, она обнаруживается лишь при удалении масел и части смол из битума селективным растворителем. Такая схема справедлива для нефтяных битумов, у которых сильно развита коагуляционная структура и мало кристаллических составляющих. Их структура состоит из глобулярных ассоциированных мицелл.

В битумах твердых топлив развита кристаллическая структура, состоящая из восков и парафинов. Эти вещества, выкристаллизовываясь из расплава или раствора, образуют структурный каркас из сростков кристаллов. Образовавшаяся кристаллизационная структура определяет специфические свойства этих битумов, обладающих жесткостью, малой эластичностью и хрупкостью. Торфяные битумы следует рассматривать как кристаллизационные структуры, проявляющие пластические свойства в силу высокой пластичности слагающих кристаллов. В зависимости от состава торфа и применяемого экстрагента структуры их могут быть различными. В малобитуминозном магелланикум-торфе присутствует мало кристаллических веществ, они не образуют сплошной кристаллической структуры, а срастаются отдельными игольчатыми кристаллами. Высокобитуминозный сосново-пушицевый торф содержит значительное количество (> 60 %) восков, которые образуют типичную кристаллическую структуру. Однако относительно высокое содержание смолистой части придает данному битуму характер вязкого скола. Наибольшее количество кристаллических веществ (>80 %) находится в бурогольном битуме при бензольной экстракции. Поэтому характер его скола резко отличается от рассмотренных, и структура его типична для кристаллического вещества с хрупкими свойствами [35].

Если макроструктуры битумов твердых топлив различаются, то микроструктура (строение кристаллов) для всех битумов одинакова и тождественна нефтяному парафину, что показано М.П. Воларовичем и К.Ф. Гусевым [35] с помощью рентгеноструктурного анализа, а также более четко методом электронографии [36].

Элементарной кристаллической ячейкой битумов является ромбическая гранецентрированная решетка с параметрами  $a = 4,97 \pm 0,01 \text{ \AA}$ ;  $b = 7,43 \pm 0,01 \text{ \AA}$ ;  $c = 2,5 \pm 0,01 \text{ \AA}$ . К кристаллическим составляющим битумов относятся парафины, воска и большая часть индивидуальных составляющих восков, а к аморфным – масла и асфальтены. При одинаковой для различных битумов кристаллической структуре макроструктура их

может быть различна и будет определять разные их физические свойства. Например, чем выше кристалличность битума, тем резче выражен переход от твердого состояния к текучему. И наоборот, в других структурах сильно развиты упругопластические свойства и медленно осуществляется переход к вязкому течению [36].

Таким образом, на основании исследования структур битумов и восков в электронном микроскопе только по качественным результатам уже можно предсказать их физико-механические свойства [37].

Наиболее ценными битумами являются те, которые содержат большие количества воска. Воска – это эфиры высокомолекулярных кислот и высокомолекулярных одноатомных спиртов. Они имеют высокую температуру плавления, низкую электропроводность, дают при нанесении на поверхность изделий блестящую стекловидную поверхность. Они обладают достаточно высокой прочностью, близкой к монтан-воску<sup>1</sup>, а также высокую влагуустойчивость. Воска отличаются способностью даже при небольших добавках к другим веществам резко повышать температуру плавления сплавов и обладают рядом других свойств, обуславливающих их высокую ценность.

Используя способность восков поднимать температуру плавления других веществ и переводить в твердое состояние даже жидкости, например минеральные масла, в промышленности изготавливают многочисленные смеси, имеющие повышенную температуру плавления или каплепадения.

Добавкой восков к парафину повышают температуру плавления последнего. При добавлении воска к маслам увеличивается вязкость последних вплоть до превращения их в твердые продукты. Особенностью восков является их способность резко повышать температуру плавления и прочность углеводородных сплавов даже при небольших концентрациях в углеводородах. В отличие от канифоли, сплавы восков не увеличивают липкость поверхности. Это свойство используется, например, при изготовлении копировальной бумаги.

Сплавы восков с другими твердыми веществами применяются для отделки поверхности разнообразных изделий из кожи, дерева, пластических масс, бумаги и других материалов. Они придают этим изделиям блестящую поверхность, предохраняя их от износа и делая обработанные изделия влагуустойчивыми.

---

<sup>1</sup> Монтан-воск – продукт перегонки или экстракции органическими растворителями битуминозных бурых углей. Он содержит свободную и связанную в виде эфиров алифатических спиртов монтановую и карбоцериную кислоты со значительными примесями смол и других соединений. Монтан-воск широко применяется в качестве неомыляемого и омыляемого сырья при изготовлении консистентных смазок.

Особенно большое количество восков потребляется в кожевенном производстве в виде сплавов «кремов», а также в виде водных эмульсий. Лучшими эмульгаторами для них служат калийные соли, например поташ.

Также воск нашел широкое применение в литейном деле при отделке поверхности формовочных земель и во многих других производствах.

Состав битумов в торфе крайне неоднороден. Вследствие того, что различные группы соединений, входящие в состав битумов торфа, имеют неодинаковую растворимость в органических растворителях, их выход и состав зависят от природы растворителя, избранного для проведения экстракции.

Битумы относятся к самым насыщенным водородом соединениям торфа, в их состав входит ряд соединений, которые объединяют по сходным признакам в группы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Состав битумов торфа, % [38]

Компоненты битумов	Верховой торф	Низинный торф
Воски	16,63–55,66	42,39–80,94
Смолы	16,55–44,39	7,44–37,21
Парафины	4,40–11,40	2,41–5,99
Масла	16,57–27,3	7,00–16,70

П.И. Белькевич, изучая состав восков, пришел к выводу, что в самих растениях-торфообразователях битумы различны [39]: верховые содержат стойкие соединения (воск, предельные углеводороды), битумообразователи низинных торфов имеют биохимически неустойчивые вещества (хлорофилл, ненасыщенные соединения, кислородсодержащие и др.).

Со временем количество битумов в залежи почти не меняется. Однако наблюдается увеличение содержания восковой части и уменьшение смолистой. Это указывает на вторичные процессы, происходящие в залежи и сопровождающиеся переходом смол в высокомолекулярные соединения. Зольность битумов невысока и обычно находится в пределах 0,12–0,94 %. Химический состав воска в настоящее время известен [40, 41]. Воск представлен высокомолекулярными спиртами, кислотами и их эфирами. В состав воска входят алифатические предельные и непредельные углеводороды  $C_{33}H_{66}$ ,  $C_{33}H_{68}$ ,  $C_{33}H_{72}$  и углеводороды с количеством атомов углерода  $C_{23}$ – $C_{33}$ ; циклические углеводороды  $C_{23}$ – $C_{24}$  ( $C_{20}H_{12}$ ,  $C_{15}H_{24}$ ); алифатические спирты  $C_{20}$ – $C_{30}$  ( $C_{20}H_{40}O_4$ ,  $C_{20}H_{42}O$ ,  $C_{24}H_{50}O$ ,  $C_{22}H_{52}O$ ,  $C_{22}H_{46}O$ ); циклические спирты  $C_{30}H_{52}O$ ,  $C_{27}H_{50}O$ ; алифатические кислоты  $C_{12}H_{22}O_2$ ,  $C_{14}H_{26}O_2$ ,  $C_{16}H_{34}O_2$  и т. п.; оксикислоты  $C_{20}$ – $C_{21}$  и др. Парафиновые и терпеновые углеводороды, смоляные кислоты растворяются в горячем бензине. Асфальтены растворимы в бензоле. Они имеют относительно невысо-

кое содержание водорода. Молекулярная масса их изменяется в пределах 1 100–1 500, а температура плавления – около 300 °С. Масла битумов представляют жидкую часть и имеют плотность <1 000 кг/м<sup>3</sup> и молекулярную массу ~600. Смоляная часть повышает вязкость и эластичность битумов и представлена соединениями с молекулярной массой ~600 и плотностью 1 000–1 080 кг/см<sup>3</sup>, температура плавления ~100 °С.

Содержание бензольных битумов колеблется в пределах 1,2–17,7 % и зависит от природы торфа. Из растений-торфообразователей наибольшее количество битумов содержат вересковые кустарнички, а наименьшее – мхи. В залежах низинного типа нижний предел совпадает с верховыми, однако верхние пределы существенно отличаются. По средним значениям битуминозности типы торфа располагаются в ряд: низинный < переходный < верховой. Торф низинного типа по содержанию битумов различается мало. Однако можно отметить для типов торфа общую тенденцию роста битуминозности с увеличением степени разложения. Для низинного и переходного торфа эта связь очень слабая, и можно говорить лишь о ее направленности.

В верховом торфе связь более тесная – с коэффициентом корреляции  $r = 0,85$ , что позволяет надежно прогнозировать битуминозность торфа по степени разложения [42]. Уравнение регрессии для верхового торфа имеет вид

$$B = 0,17 R_T + 3,33 \pm 0,55, \dots \dots \dots (3.1)$$

где  $B$  – содержание битумов на органическое вещество, %; 0,55 – средне-квадратическая ошибка. Для верхового торфа ненарушенной структуры существует довольно тесная связь  $r = 0,75$  между битумами и содержанием фракций меньше 250 мкм ( $P_{250}$ , %), определяемых мокрым ситовым анализом. Уравнение регрессии

$$B = 0,12 P_{250} + 0,87 \pm 1,85. \quad (3.2)$$

Содержание битумов в торфе верхового типа увеличивается от моховых к древесным видам. По битуминозности (бензольные битумы) верховой торф образует следующий ряд: сосново-пушицевый (12,6) > пушицевый (11,7) > сосново-сфагновый (10,3) > сосновый (10,2) > шейхцериевый (8,3) > пушицево-сфагновый (8,2) > шейхцериево-сфагновый > магелланикум > сфагново-мочажинный > фускум (4,5).

Различная битуминозность торфа объясняется неодинаковым начальным содержанием битумов в растениях и вторичными процессами, протекающими в торфяной залежи. Большой битуминозности верховой торф достигает за счет синтеза смолистой части при конденсации гуминовых кислот с сахарами и альдегидами. В этом случае происходит не только накопление гуминовых кислот в результате распада, но и превращение их в битумные вещества при взаимодействии кислот с продуктами неполного разложения (клетчатка, пектиновые вещества, белки, жиры). В низинном торфе эти процессы искажаются влиянием водно-минерального режима,

при котором происходит образование торфа. Содержание битумов тесно связано с составом золы, в первую очередь с содержанием Са и рН (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Содержание битумов в низинном торфе с различным содержанием СаО в золе

Вид торфа	R <sub>т</sub> , %	Содержание СаО, %	Содержание битумов, %	
			Исходный торф	Декальцинированный торф
Сфагновый	15	0,76	6,14	8,0
Осоковый	20	1,45	5,92	6,1
	35	1,1	5,51	6,8
	45	3,84	2,49	3,3
Тростниковый	45	1,22	7,14	8,3
Древесный	45	1,63	9,22	9,4
	50	1,15	8,86	10,0
	55	3,45	2,66	4,5

Увеличение в торфе кальция влечет за собой уменьшение содержания битумов. В прямом эксперименте на одном и том же торфе было показано увеличение выхода битумов после удаления из него кальция (табл. 3.2). Поэтому для низинного и переходного составов торфов надежную прогнозную оценку битуминозности можно получить только с учетом катионного состава и кислотности торфа. Уравнения множественной регрессии по определению содержания битумов имеют вид [77, 78]:

$$B = 0,09 R_{т} - 0,05 Ca + 0,66; \quad (3.3)$$

$$B = 0,28 P_{10} - 0,03 Ca - 3,24; \quad (3.4)$$

$$B = 0,26 P_{10} - 1,52 pH - 7,10, \quad (3.5)$$

где R<sub>т</sub> – степень разложения, %; P<sub>10</sub> – содержание фракций меньше 10 мкм, определяемых по номограммам [43], %; Са – содержание катионов кальция в 100 г сухого вещества торфа, мг-экв/100 г; рН – показатель кислотности.

В уравнениях (3.3)–(3.5) совокупные коэффициенты корреляции соответственно равны 0,75; 0,88; 0,86. По приведенным уравнениям (3.1)–(3.5) можно рассчитать и составить прогнозную оценку битуминозности торфа, не прибегая к трудоемким химическим анализам.

Таким образом, основными признаками, определяющими содержание битумов в торфе, являются показатели степени биохимического распада (верховой торф) и насыщения торфа неорганическими соединениями (низинный торф). В верховом торфе оценку битуминозности можно проводить по уравнениям парной корреляции. Если же такая оценка проводится для участка или месторождения в целом, когда ботаническая при-

надлежность различна, то лучше пользоваться уравнениями множественной корреляции для низинного торфа.

Для проведения анализов торфа на битуминозность используется аппарат Грефе (рис. 3.1). Навеска торфа помещается в специально изготовленную из плотной фильтровальной бумаги гильзу 2 диаметром 35 мм и высотой 100–120 мм. На дно гильзы и сверху торфа укладывается по кусочку обезжиренной ваты. Гильза с торфом помещается в двухслойный марлевый мешочек и подвешивается на крючке в пробке холодильника 1 в аппарате Грефе таким образом, чтобы конденсирующиеся пары бензола из холодильника стекали по центру гильзы. В колбу 3 наливается 250 мл бензола. Затем в рубашку холодильника пускается вода и включается нагрев песочной бани 4, на которой устанавливается колба.

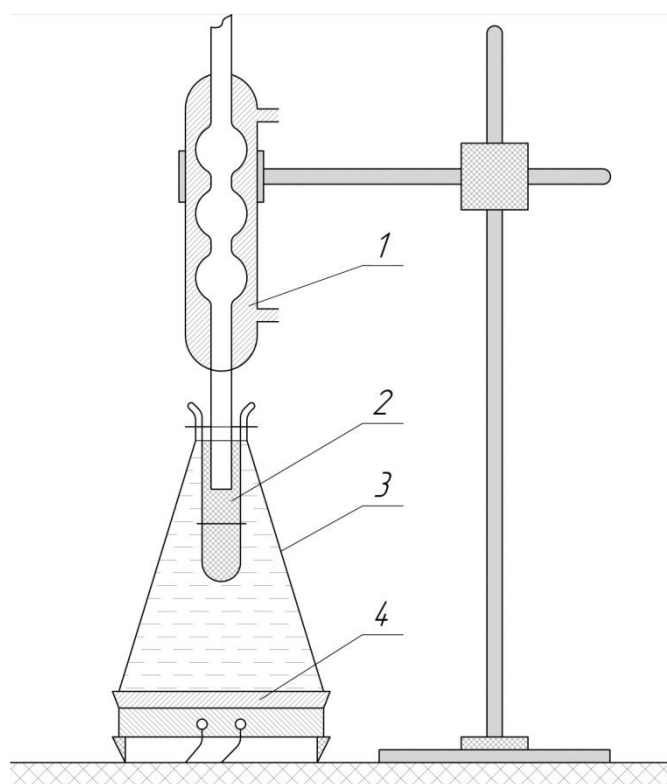


Рис. 3.1. Схема аппарата Грефе для экстракции битумов

В процессе проведения эксперимента необходимо следить за постоянной подачей воды в холодильник и равномерным кипением бензола. По мере кипения растворителя торф пропитывается бензолом, стекающим из холодильника. Экстракция проводится до того момента, когда капли бензола, стекающие с мешочка, станут бесцветными и на марле исчезнут следы битумов. После окончания экстракции, продолжающейся, как правило, около 10–12 ч, гильза с торфом извлекается из аппарата и помещается в фарфоровую чашку в вытяжном шкафу для испарения растворителя (бензола). Для отгонки растворителя бензольная вытяжка битумов перели-



вается в колбу 1 емкостью 500 мл, соединенную с холодильником Либиха 2 и приемником 3, в который собирается получаемый в процессе отгонки бензол (рис. 3.2).

Остаток после отгонки бензола переносится во взвешенные на аналитических весах бюксы. Затем бюксы выдерживаются в вытяжном шкафу для удаления оставшегося бензола и высушиваются в вакуумном шкафу при температуре 40 °С.

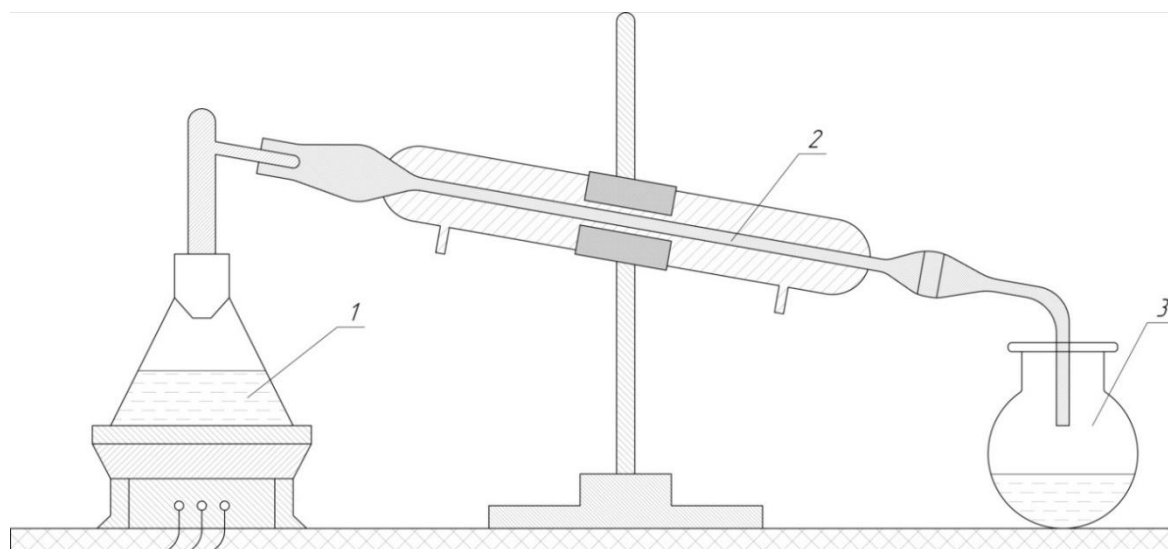


Рис. 3.2. Схема аппарата для отгонки растворителя

Содержание битумов вычисляется по формуле

$$B = \frac{m_b}{m_o} \cdot 100 \%,$$

где  $m_b$  – масса сухих битумов, г;  $m_o$  – органическая масса исходного торфа, г, которая рассчитывается по формуле

$$m_o = m \cdot \left[ 1 - \frac{w}{100} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{A^c}{100} \right], \quad (3.6)$$

где  $m$  – масса навески торфа, г;  $w$  – влажность исходного торфа, %;  $A^c$  – зольность исходного торфа, %.

Битумные компоненты из торфа экстрагирует широкий класс органических растворителей.

Требования, предъявляемые к растворителям, применяемым при извлечении битумов из топлива:

селективность по одному из компонентов или максимально возможное извлечение широкого спектра битумных веществ;

наличие узкого предела взрываемости паров растворителя в смеси с воздухом;

инертность по отношению к воде;

температура кипения в пределах 75–130 °С;

низкая теплоемкость и теплота испарения;  
хорошая сплавляемость с парафином;  
минимально возможная опасность для здоровья людей.

Экспериментально установлено, что одни растворители удовлетворительно, а другие очень слабо растворяют смолистую часть битумов. Некоторые из них недостаточно эффективно растворяют высокомолекулярные воска, хорошо растворяя при этом масла и парафин. В то же время необходимо подчеркнуть, что растворимость восков в большинстве растворителей резко возрастает с повышением температуры.

Слабыми растворителями битумов являются низкокипящие углеводороды жирного ряда (например, петролейный эфир).

Значительно полнее экстрагируют ароматические углеводороды. Наиболее распространенным из них является бензол. По сравнению с бензином бензол лучше растворяет смолы и воска. Этиловый спирт, хорошо растворяя смолы битумов, недостаточно растворяет воск. Таким образом, лучшими растворителями всех компонентов битумов являются их различные смеси. В качестве характерного примера смешанных растворителей можно привести спиртобензольные смеси. Они обычно приготавливаются из равных объемов бензола и этилового спирта. Спиртобензол достаточно полно растворяет смолистую часть битумов, что и позволяет наиболее полно извлекать все составные части битумов.

Кроме вышеперечисленных растворителей, имеющих промышленное значение, следует указать дихлорэтан, экстракционная способность которого выше, чем у бензола, и несколько ниже, чем у спиртобензольной смеси. Основным его преимуществом является то, что он не взрывоопасен. Дихлорэтан хорошо растворяет как смолы битумов, так и воска. Легкокипящие масла сухой перегонки топлив также можно рекомендовать для применения в качестве растворителя для битумов.

Величины выхода битумов при экстрагировании абсолютно сухого торфа верхового типа со степенью разложения 35 % различными растворителями при температуре их кипения приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Выход битумов при экстрагировании торфа растворителями [43]

Вид растворителя	Выход битума, %
Эфир	3,5
Бензин	5,0
Бензол	8,0
Спиртобензол	12,0
Дихлорэтан	10,5

В то же время в зависимости от соотношения содержания в битуме восков и смол величина процентного выхода битумов при извлечении их из

торфа различными растворителями может колебаться, равно как и отдельные частицы битумов торфа резко отличаются по температурам плавления, содержанию смол, свободных кислот и эфиров. Эти разнородные по составу битумы могут быть относительно легко выделены методом ступенчатой седиментации в виде продуктов, содержание в которых битумов выше, чем у исходного торфа, и состав битумов отличается от состава суммарных битумов торфа.

Таким образом, идеальный растворитель, который удовлетворял бы всем перечисленным требованиям, на настоящий момент не найден. В то же время из всех исследованных и чаще всего применяемых растворителей (табл. 3.4) большей селективностью обладают гексан и фракции бензина. Экстракты, извлекаемые из торфа бензином, содержат меньше смолистых веществ по сравнению с другими растворителями. В связи с этим за основные критерии качества были приняты его растворимость в бензине и сплавляемость с парафином.

Таблица 3.4

Влияние растворителя на выход и состав экстракта [44]

Вид растворителя	Выход экстракта, %	Состав экстракта, %			Выход воска, %
		Смолы	Воска	Асфальтены	
Бензол	10,6	21	64	15	6,79
Этиловый спирт	10,4	32	56	12	5,82
Дихлорэтан	11,0	20	70	10	7,70
Фракции бензина 20	7,0	10	88	2	6,16
Фракции бензина 50	7,8	12	87	1	6,79
Гексан	6,7	9	90	1	6,03
Смесь бензола с этиловым спиртом (9:1)	14,1	39	48	13	6,77
Смесь бензола с этиловым спиртом (7:3)	14,6	33	49	18	7,15

По данным П.И. Белькевича экстракт, извлеченный из сосново-пушицевого торфа бензином, содержит около 74 % воска и 26 % смол, а раствор, полученный из этого же торфа бензолом, только 59 % воска, 25 % смол и 16 % асфальтенов. Кроме того, бензиновый экстракт полностью сплавлялся с парафином и хорошо растворялся в горячем бензине. Бензин марки БР-2 является наиболее подходящим растворителем для технологического процесса получения битумов из торфа.

В отличие от многих видов торфа, лигнитов, а также молодых бурых углей, каменный уголь и старые бурые угли не содержат восков. В обессмоленной части битумов этих горючих ископаемых зачастую содержатся масла, концентрация которых в битуме может достигать 70 %.

Для более глубокого понимания процесса извлечения битумов из торфа органическими растворителями необходимо располагать сведениями о составе битумов, поведении отдельных растворителей, а также о влиянии физических свойств торфа на протекание процесса экстракции. Для практических целей наиболее существенными являются сведения о скорости и полноте извлечения битумов в различных условиях. Если экстракция производится из кускового торфа, извлечение не ограничивается влиянием экстракционной способности растворителя. Прежде всего следует отметить, что при использовании одного и того же растворителя с повышением температуры процесса скорость экстракции растет, так как растворимость битумов с повышением температуры в органических экстрагентах увеличивается, а вязкость падает. В результате диффузия битумов из капилляров кускового торфа в растворитель облегчается. При повышении температуры экстракции до температуры плавления битума резко увеличивается скорость извлечения битума, который смешивается с растворителем.

При сравнительно невысоких температурах, значительно меньших температуры плавления битума, скорость экстракции снижается в 1,5–2 раза. При ограниченной растворимости битума в используемом растворителе при низких температурах скорость экстракции падает настолько, что извлечение становится нецелесообразным.

В качестве примера можно привести экстракцию высокомолекулярных восков холодным бензином, который очень слабо растворяет воска при низких температурах.

Таким образом, оптимальной температурой экстракции битумов в практических условиях является температура на 2–3 °С ниже температуры кипения растворителя. Такой режим позволяет, не усложняя производства и избегая больших потерь растворителя, проводить полное извлечение битумов в максимально короткий период.

Кроме перечисленных выше факторов, на продолжительность процесса экстракции большое влияние оказывает размер куска торфа. Это происходит потому, что вначале растворитель должен проникнуть в материал по капиллярам, а затем раствор битумов должен продиффундировать из куска во внешнюю среду, заполненную растворителем.

Экспериментально установлено (табл. 3.5, 3.6) [45], что в торфе, измельченном до порошкообразного состояния ( $d < 1$  мм), экстракция битумов протекает очень быстро и предел извлечения для бензола наступает (при температуре кипения последнего) менее чем за один час. В то же время для зерен торфа с сечением 1–3 мм и через 3 ч не наступает предела извлечения битумов тем же растворителем. Влияние длины капилляров куска торфа проявляется особенно четко в случае экстракции еще более крупных кусков торфа (7–10 мм).

После незначительного насыщения массы растворителя битумами их диффузия из капилляров во внешнюю среду растворителя резко падает. Наилучшей областью для экстракции является наружный слой, имеющий толщину до 0,25 мм.

Таблица 3.5

Экстракция торфа бензолом [4]

Продолжительность экстракции, мин	Выход битума на органическую массу торфа, %		
	размолотый торф $d < 1$ мм	зерна торфа $d = 1-3$ мм	куски торфа $d = 7-10$ мм
60	6,58	4,74	2,49
120	6,56	5,09	3,23
180	–	5,17	3,66
240	–	–	3,67

Таблица 3.6

Экстракция торфа бензином [4]

Продолжительность экстракции, мин	Выход битума на органическую массу торфа, %		
	размолотый торф $d < 1$ мм	зерна торфа $d = 1-3$ мм	куски торфа $d = 7-10$ мм
120	3,58	2,85	2,05
240	4,21	3,18	2,39
480	4,63	3,64	2,90

Влияние размера обрабатываемого куска торфа сказывается на начальной и конечной стадиях процесса. После того как концентрации битума в растворителе, находящемся внутри куска и снаружи, будут близки, скорость извлечения битума из кусков резко падает, что приводит к необходимости замены растворителя свежими, не содержащими битум, порциями.

После замены растворителя (табл. 3.7) процесс извлечения возобновляется и скорость извлечения битумов из мелкокускового материала увеличивается. Практическая полнота извлечения битумов у размолотого торфа достигается в результате двух экстракций бензолом по 4 ч, в то время как у торфа с величиной куска 7–10 мм тот же эффект может быть достигнут в результате проведения трех-четырех периодов экстракций по 4 ч каждый.

Масса каждой порции растворителя сказывается на глубине экстракции в случае извлечения битумов из кускового торфа и незначительно влияет на обработку размолотого материала. Чем больше объем использованного растворителя при экстракции кускового материала, тем

больше за один период может быть извлечено битума, так как ускоряется процесс его диффузии из капилляра. Многократно повторяющаяся экстракция торфа с различным размером куска стабилизирует выход битумов. В то же время в производственных условиях такой подход нецелесообразен, поскольку увеличение продолжительности процесса значительно снижает производительность экстракторов. Таким образом, практический выход битумов (при постоянном времени экстракции) уменьшается с увеличением размера куска экстрагируемого торфа.

Таблица 3.7

Экстракция торфа бензолом [5]

Степень экстракции	Время, мин	Выход битума на органическую массу, %	
		Размолотый торф $d < 1$ мм	Куски торфа $d = 7-10$ мм
Первая порция растворителя	240	6,57	4,45
Вторая порция растворителя		0,97	1,66
Третья порция растворителя		–	0,62
Итого битума		7,54	6,73

Масса каждой порции растворителя сказывается на глубине экстракции в случае извлечения битумов из кускового торфа и незначительно влияет на обработку размолотого материала. Чем больше объем использованного растворителя при экстракции кускового материала, тем больше за один период может быть извлечено битума, так как ускоряется процесс его диффузии из капилляра. Многократно повторяющаяся экстракция торфа с различным размером куска стабилизирует выход битумов. В то же время в производственных условиях такой подход нецелесообразен, поскольку увеличение продолжительности процесса значительно снижает производительность экстракторов. Таким образом, практический выход битумов (при постоянном времени экстракции) уменьшается с увеличением размера куска экстрагируемого торфа.

Влияние вида растворителя на глубину и скорость течения процесса экстракции связано с рядом его химических характеристик. Существуют растворители, которые обладают способностью к растворению лишь некоторых составных частей битумов. Они извлекают битумы с пониженной скоростью, так как образующиеся на битуме пленки из нерастворимой части последнего (смолы) замедляют экстракцию.

Смолы битумов отличаются плохой растворимостью в бензине, поэтому наблюдается снижение скорости экстракции битумов этим растворителем при увеличении размера куска, а также значительное уменьшение общего выхода битумов. Угол наклона кривых к оси абсцисс при

экстракции бензином меньше, чем при экстракции бензолом. Это заметно при анализе результатов как в кусках торфа размером 7–10 мм, так и в размолотом торфе. При экстракции бензолом в течение 1 ч из размолотого торфа извлекаются все битумы, способные перейти в раствор, в то время как при использовании бензина такого же эффекта удается достичь только через 7–8 ч.

Пористость торфа оказывает влияние на скорость течения процесса экстракции. Здесь в основном процесс зависит от геометрии расположения капилляров внутри куска топлива, а также их длины и площади сечения. При прочих равных условиях скорость процесса извлечения битумов из торфа должна быть обратно пропорциональна длине капилляров и прямо пропорциональна величине их сечения. Это подтверждается оценкой влияния плотности торфа на скорость извлечения битумов (табл. 3.8).

Закономерно, что чем большей механической переработке подвергается торфомасса перед формованием, тем более плотным и, соответственно, менее пористым получается кусок (гранула) торфа. Переработка торфомассы во влажном состоянии приводит к измельчению сохранившихся форменных остатков растений. В дальнейшем при сушке такой торф дает бóльшую усадку с увеличением как минимум на 15 %, плотности сформованных кусков. В дальнейшем это обуславливает снижение скорости экстракции более чем на 40 %. Наиболее резкое падение скорости экстракции наблюдается в тот момент, когда величина пустот в куске торфа уменьшается с 33 до 27 %. При понижении объема пор с 40 до 33 % каждый процент потерянной пористости уменьшает на 1,5 % скорость экстракции. При снижении этой величины с 33 до 27 % уменьшение пористости на 1 % приводит к замедлению процесса экстракции в среднем на 5,5 %.

Таблица 3.8

Влияние плотности торфа на скорость извлечения битумов при экстракции бензолом [4]

Экстракция торфа	Выход битумов, %		Плотность куска торфа, кг/м <sup>3</sup>
	Экстракция в течение 120 мин	Дальнейшая экстракция в течение 240 мин	
Торф без дополнительной механической переработки	2,61	1,70	865
Смесь непереработанного торфа с однократно механически диспергированным (соотношение 1:1)	2,28	1,54	961

Однократно механически диспергированный	1,60	0,94	1 035
Трехкратно механически диспергированный	1,67	0,98	1 038

Разрушение прямолинейного расположения волокнистой ткани (при механической переработке влажного торфа) и переход к хаотической системе узких капилляров является главной причиной понижения скорости экстракции из кусков торфа, сформованных из переработанной массы.

Влияние влажности торфа на процесс экстракции имеет свои особенности. При сравнительно большой влажности (> 50 %), когда поры торфа в значительной мере заполнены влагой, скорость экстракции битумов из топлива падает. При меньших же влажностях, когда влага не препятствует проникновению растворителя внутрь кусков, выход битума из торфа растет (табл. 3.9) с увеличением содержания влаги в топливе.

Таблица 3.9

Влияние влажности торфа на выход битума [45]

Диаметр куска, мм	Влажность, %	Вид растворителя	Выход битума, %
7–10	14,5	Бензол	3,67
	28,5		4,41
	37,4		4,80
	14,5	Бензин	2,90
	37,4		3,29
Порошок	14,10	Бензол	7,36
	24,70		7,76
	34,69		7,87

Характерно, что это явление имеет место при экстракции кусков топлива различного размера, а также при использовании широкого спектра растворителей. Аналогичное явление наблюдалось при экстракции битума из углей. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод: в технологическом процессе целесообразно применять диспергированный торф после полевой сушки до 35 %, что снимает необходимость его специальной заводской подсушки перед экстракцией.

### Контрольные вопросы

1. Какие группы химических соединений органического вещества торфа относятся к битумам?
2. Строение битумов, их основные отличия от битумов других видов топлив.
3. Торфяной воск, области его применения в промышленности.



4. Зависимость содержания битумов в торфе от его основных природных и физико-химических характеристик.

5. Раскройте методику определения битумов в торфе. Какие методики вам известны?

6. Расскажите о требованиях, предъявляемых к растворителям, используемым для экстракции битумов.

7. Какое влияние оказывает вид растворителя на выход и состав битумного экстракта из торфа?

8. Какие факторы влияют на скорость и полноту извлечения битумов в различных условиях проведения процесса экстракции?

9. Влияние степени механической переработки торфяного сырья на выход битумов.

10. Расскажите о влиянии плотности и влажности торфа на скорость извлечения битумов.

### **3.2. Растворимость сырого торфяного воска в растворителях**

Сырой торфяной воск представляет собой сложный сплав органических соединений различных классов. В связи с этим при изменении температуры экстрагирования изменяется не только выход экстракта, но и его качественные характеристики. Для оценки этого влияния была определена его растворимость в широко применяемом в промышленной технологии бензине БР-2, а также в наиболее распространенном органическом растворителе – ацетоне [46].

Растворимость сырого торфяного воска в бензине была исследована при температурах от 0 до 60 °С с шагом 10 градусов. Сырой воск измельчался до частиц размером менее 2 мм. Растворение проводилось при интенсивном перемешивании воска с растворителем при заданной температуре.

Все эксперименты проводились с одной (средней) пробой сырого воска, навеска которого составляла примерно 2 г. Предварительный анализ, проведенный при 0 °С, установил, что растворение продолжается в течение 30 мин при расходе 18 весовых частей растворителя на 1 часть воска. Экспериментальные данные представлены в табл. 3.10.

Экспериментально установлено, что при температуре ниже 60 °С бензин избирательно извлекает вещества, обладающие более низкой температурой каплепадения. Чем ниже температура растворителя, тем ниже и температура каплепадения экстракта. С целью уточнения выхода и характера продуктов, извлекаемых в узких температурных интервалах, была проведена последовательная экстракция навески сырого торфяного воска массой 4 г при температурах от 0 до 70 °С с шагом 10 градусов.

Таблица 3.10

## Растворимость сырого воска в бензине БР-2 [6]

Температура процесса, °С	Выход экстракта, %	Температура каплепадения экстракта, °С	Массовая концентрация раствора	Расход растворителя кг/кг воска
0	23,0	44	1,28	17,6
10	30,9	48	1,72	17,7
20	46,0	50	2,37	18,9
30	65,1	57	3,37	18,7
40	75,5	62	3,91	18,7
50	89,2	65	4,47	19,0
60	100,0	75	5,19	18,6

Растворимость определялась так же, как и в предыдущей (см. табл. 3.10) серии опытов. Средние результаты с трехкратной повторяемостью приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

## Последовательная экстракция сырого торфяного воска в бензине БР-2 [46]

Температура процесса, °С	Выход экстракта, %	Температура каплепадения экстракта, °С	Массовая концентрация раствора
0	24,9	43	2,40
10	8,4	52	0,92
20	13,9	59	1,30
30	13,4	65	1,26
40	12,1	68	1,24
50	11,5	76	1,15
60	9,6	84	1,00
70	6,2	90	0,70

Установлено, что в сыром торфяном воске, полученном в опытно-промышленных условиях из сосново-пушицевого торфа, содержалось до 25 % веществ с температурой каплепадения 43 °С; 25,5 % веществ с температурой каплепадения 65–68 °С (аналогичной пчелиному воску); 15,8 % веществ с температурой каплепадения 84–90 °С.

Таким образом, последовательной экстракцией сырого торфяного воска можно получать продукты с разной температурой каплепадения.

Согласно действующим стандартам на монта-воск и восковые продукты, вещества, растворимые в ацетоне при 15–20 °С, считаются смолами. По техническим условиям на сырой торфяной воск смолами также считаются вещества, не кристаллизующиеся из раствора сырого воска

в ацетоне при 0 °С. Для уточнения этого вопроса Институтом торфа АН БССР<sup>2</sup> была проведена серия исследований по растворимости сырого торфяного воска в ацетоне [46].

В исследованиях была использована та же методика и проба сырого воска, что и для определения растворимости в бензине. Растворение проводилось при температурах 0, 10 и 20 °С для частиц сырого воска размером 0–2, 1–2, 0,5–1, 0,25–0,5 мм и менее 0,25 мм. Для сравнения было определено содержание смол по методике, принятой в технических условиях на торфяной битум. Результаты исследования показывают, что на выход растворимых в ацетоне компонентов существенно влияет температура и размер частиц воска. Чем выше температура и мельче частицы, тем выше выход. Вещества, растворимые в ацетоне при 20 °С, аналогичны растворимым в бензине при 10 °С по выходу и температуре каплепадения. Содержание смол равно выходу растворимых в ацетоне веществ при 10 °С из частиц менее 0,25 мм. Следовательно, возможно определение содержания смол в сыром торфяном воске путем растворения измельченных до размера менее 0,25 мм частиц воска в ацетоне.

Процесс экстракции в системе «твердое тело – жидкость» складывается из двух стадий:

проникновение растворителя в поры твердого тела (смачивание) и растворение извлекаемого компонента;

диффузия растворимого компонента из частиц экстрагируемого материала в растворитель.

На скорость экстракции влияет главным образом вторая стадия процесса, так как процесс растворения протекает относительно быстро.

Движущей силой диффузии является градиент концентрации  $\frac{dc}{dx}$ .

Процесс диффузии описывается первым законом Фика [47], согласно которому количество вещества  $M$ , продиффундировавшего через поверхность  $F$  за время  $t$ , пропорционально градиенту концентрации:

$$M = -D F \tau \frac{dc}{dx}, \quad (3.7)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, являющийся функцией свойств извлекаемого вещества, характеристик среды, в которой протекает диффузия, и температуры. Обычно величина  $D$  возрастает с увеличением температуры.

Из уравнения диффузии следует, что чем больше удельная поверхность частиц экстрагируемого материала (чем меньше размер частиц) и чем выше значение градиента концентраций, тем больше скорость экстракции.

---

<sup>2</sup> В настоящее время это Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (г. Минск).

Однако при практическом осуществлении этого процесса в неподвижном слое экстрагируемого материала измельчение должно ограничиваться частицами не менее 0,5 мм. В противном случае проход растворителя и особенно процесс удаления (отдувки) растворителя от проэкстрагированного материала будет затруднен.

Крошка экстрагируемого материала должна состоять из близких по размеру частиц, идеальный вариант – частицы одного размера. Это позволяет обеспечить равномерное извлечение экстракта из всех частиц и получение его большего количества за меньшее время.

Для обеспечения максимального значения градиента концентрации экстракцию рекомендуется проводить методом противотока при быстрой (непрерывной) смене контакта растворителя с твердой фазой. Этому требованию лучше всего отвечает экстракция методом орошения (фильтрации растворителя через экстрагируемый материал сверху вниз).

Температура процесса экстракции ограничивается температурой кипения растворителя и должна быть ниже на 2–5 °С точки кипения. Повышение температуры экстракции, которое достигается за счет давления, приводит к ухудшению качества экстракта в результате извлечения веществ невоскового характера.

При разработке технологии производства воска из торфа, на опытно-промышленной установке испытывались различные способы экстракции: настаивание торфа в растворителе при атмосферном и повышенном (300 кПа) давлениях; перемешивание торфа с растворителем с последующим отжатием раствора от проэкстрагированного торфа на прессе; фильтрация растворителя через слой торфа снизу вверх; фильтрация растворителя через слой торфа сверху вниз; конденсация паров растворителя в торфе с последующей фильтрацией растворителя сверху вниз.

#### **Настаивание торфа в растворителе**

Способ настаивания при атмосферном давлении при температуре 70–75 °С и 4–5-разовой смене растворителя обеспечивает высокий процент извлечения воска при небольшом расходе растворителя и малых энергетических затратах. Он позволяет в случае необходимости обеспечить раздельное получение смолистых веществ и сырого воска улучшенного качества.

#### **Перемешивание торфа с растворителем с последующим отжатием мисцеллы<sup>3</sup> от проэкстрагированного торфа на прессе**

Исследования этого способа выполнялись с торфяной крошкой (частицы размером до 7 мм), полученной методом дробления кускового торфа. Содержание воска в торфе составляло 5,4 % от массы безводного торфа. Экстракция проводилась путем кипячения торфа с растворителем в колбе с обратным холодильником в течение 20 мин. Затем мисцеллу сливали, а проэкстрагированный торф переносили в форму и прессовали.

---

<sup>3</sup> Мисцелла – раствор битумных веществ в органическом растворителе.

Такой подход позволяет удалить более 60 % растворителя, удерживающегося на торфе после слива раствора. Это также означает, что продолжительность отдувки оставшегося растворителя водяным паром и сам расход пара будут снижены на 60 %.

Данный способ экстракции заслуживает особого внимания, так как его применение в технологии производства торфяных битумов позволяет осуществлять непрерывный процесс с минимальными издержками производства.

#### **Фильтрация растворителя через слой торфа снизу вверх**

Этот способ применяется в лесохимической промышленности для извлечения скипидара и канифоли из смолы. Его испытание также было проведено при разработке технологической части проекта опытно-промышленного завода по производству воска из торфа.

Экспериментально было установлено, что при прочих равных условиях извлечение воска данным способом значительно ниже (62,5 %), что составляет лишь 72,5 % от всего количества воска, извлеченного способом фильтрации растворителя через торф сверху вниз. Это обусловлено следующими причинами:

1. переходящий в раствор воск распределяется во всем объеме растворителя, заполняющего экстрактор;
2. поступающий снизу в экстрактор свежий растворитель имеет меньшую плотность, чем находящаяся в экстракторе мисцелла.

Таким образом, при опускания мисцеллы происходит ее смешивание с чистым растворителем. В результате этого градиент концентраций будет ниже, чем при экстракции способом фильтрации растворителя через торф сверху вниз.

**Фильтрация растворителя через слой торфа сверху вниз** широко применяется в экстракторах непрерывного действия в производстве растительных масел и монтан-воска. По сравнению с фильтрацией снизу вверх этот способ имеет большие преимущества: в экстракторе находится только то количество растворителя, которое удерживается экстрагируемым материалом при свободном стекании мисцеллы. Как выше отмечалось, на торфе удерживается 100 % растворителя к его сухому весу, что составляет примерно 50 % от его объема, идущего на заполнение экстрактора.

Переходящий в раствор воск быстро выводится из экстрактора, так как мисцелла по мере возрастания концентрации в ней воска устремляется в нижнюю часть экстрактора (к выходу из него). В результате этого значительно сокращается продолжительность процесса экстракции.

Быстрая смена контакта «растворитель – торф» обеспечивает максимально возможное значение градиента концентрации. На испарение выводится меньшее количество мисцеллы с более высоким содержанием воска.

Полученные в опытно-промышленных условиях результаты показали, что этот способ позволяет значительно сократить продолжительность экстракции при высоком коэффициенте извлечения воска. Дальнейшего сокращения продолжительности экстракции и повышения процента извлечения воска можно достичь путем увеличения интенсивности орошения.

### **Конденсация паров растворителя в торфе с последующей фильтрацией растворителя сверху вниз**

При проведении испытания этого способа на экстракцию поступала торфяная крошка с частицами 1–10 мм, полученная из фрезерного пушицево-сфагнового торфа, влажность которого колебалась от 31 до 46 %. Ее средневзвешенное значение составило 36,7 %. Процесс экстракции проводился бензином ВР-1 в три стадии.

1. Торф разогревался 35 мин до температуры 75 °С за счет тепла конденсации паров растворителя. Пары растворителя поступали из испарителей в верх экстрактора и проходили сверху через слой торфа. Получаемая при этом мисцелла выводилась в испаритель.

2. Торф промывался 30 мин раствором битумов слабой концентрации при 70 °С, а получаемая мисцелла выводилась в испаритель.

3. В течение 30 мин торф промывался чистым растворителем при 70 °С, а мисцелла выводилась в сборник слабой мисцеллы. Расход чистого растворителя и слабой мисцеллы на экстракцию составлял примерно по 800 % к массе сухого торфа.

Средний выход воска составил 5,38 %, извлечение воска из торфа – 94 %.

В результате проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Институтом торфа АН БССР был предложен способ получения сырого воска из торфа, взятый за основу при проектировании завода торфяного воска «Дукора».

Анализ литературных и патентных источников свидетельствует о том, что процесс экстракции воска из бурых углей протекает относительно быстро. Так, например, опыт специалистов из Германии по экстракции воска из бурого угля в промышленных условиях показывает, что этот процесс редко превышает 69 мин [46]. В некоторых работах [48, 49] отмечается влияние продолжительности экстракции на выход экстракта. Однако следует отметить, что авторами этих работ экстракция проводилась в условиях низкой интенсивности процесса. Пробы мисцеллы отбирались через большие промежутки времени, то есть после извлечения основной массы экстракта. В связи с тем, что торф обладает большей пористостью, чем бурый уголь, следует ожидать увеличения продолжительности процесса экстракции.

Для получения кинетических зависимостей этого процесса в работе [46] в начальный период экстракции выход воска определяли через 5 мин. В первой серии экспериментов экстракция проводилась бензином ВР-1

при 75 °С способом фильтрации растворителя сверху вниз через слой торфа, равный 1 м, на специально разработанной для этих целей установке (рис. 3.3). В качестве предмета исследований использовался резной сосново-пушицевый торф степенью разложения 40 %. Он дробился до крошкообразного состояния с размером частиц до 7 мм.

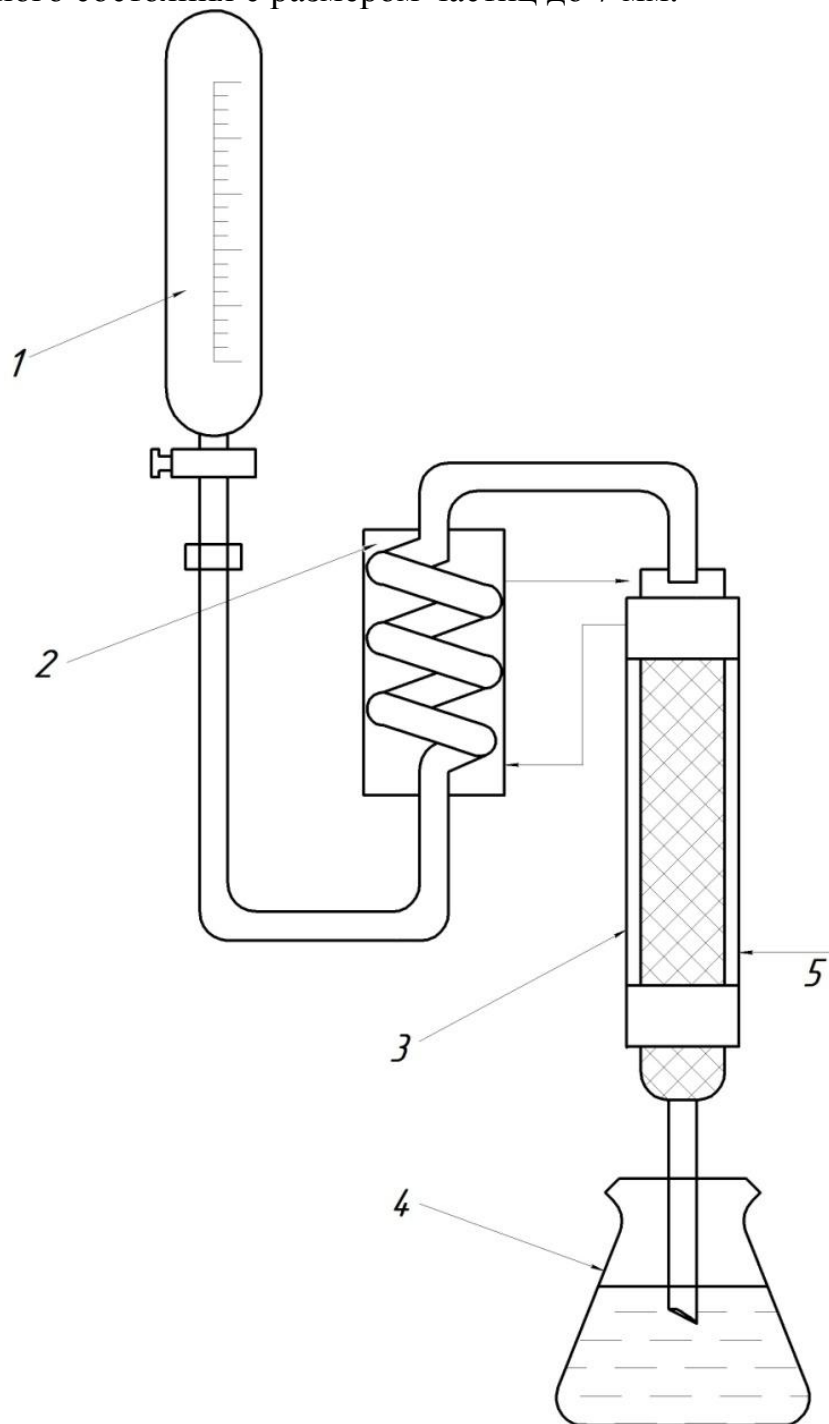


Рис. 3.3. Схема лабораторной экстракционной установки:  
1 – сосуд с растворителем; 2 – подогреватель растворителя; 3 – колонка;  
4 – приемник мисцеллы; 5 – поступление воды из ультра-термостата

Содержание воска составляло 7,07 % к сухой массе торфа. Время экстракции – 57 мин. Полученные результаты подтверждают высокую интенсивность протекания процесса извлечения битумов. В течение 20 мин было извлечено 80,5 % воска, или 87,8 % полученного экстракта. Средняя скорость извлечения за первые 20 мин составляла 0,28 %/мин, а за последние 37 мин скорость равнялась 0,02 %/мин.

Зависимость выхода воска ( $B$ , %) от продолжительности экстракции выражается уравнением [47]

$$B = K\tau^n, \quad (3.8)$$

где  $\tau$  – продолжительность экстракции, ч;  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $n$  – показатель степени.

Во второй серии экспериментов экстракция проводилась способом кипячения торфа с бензином БР-2. Одна и та же навеска торфа экстрагировалась последовательно 8 раз чистым растворителем: первый и второй раз – по 5 мин, третий и четвертый – по 10 мин, пятый и шестой – по 20 мин, седьмой и восьмой – по 40 мин. Экстрагировалась торфяная крошка с частицами 0,5–3 мм, полученная из фрезерного торфа. Зависимость выхода экстракта от продолжительности экстракции показана на рис. 3.4. Изменение скорости экстракции от времени экстрагирования приведено на рис. 3.5.

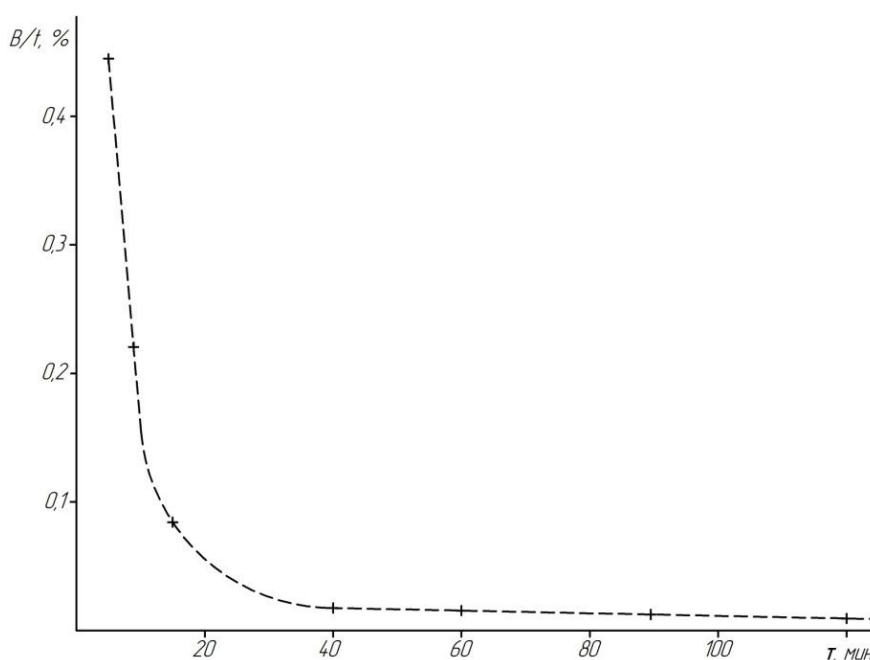


Рис. 3.4. Зависимость выхода экстракта от продолжительности процесса

Полученные в исследованиях [6] результаты позволили установить, что процесс протекает достаточно быстро, средняя скорость экстракции за первые 20 мин составляет 0,21 %/мин. В дальнейшем происходит затуха-



ние, и в следующие 30 мин скорость снижается до 0,018 %/мин. И, наконец, в последние 100 мин ее значения составляют 0,005 5 %/мин. Таким образом, за первые 5 мин извлекается 41,7 % битумов, а за 50 мин – 89,5 % по отношению ко всему полученному экстракту.

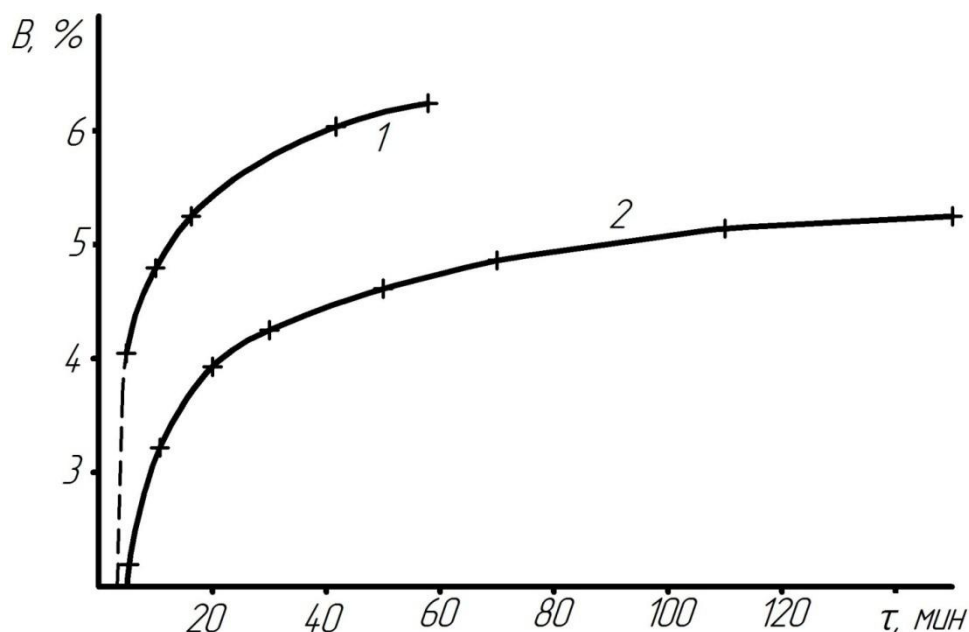


Рис. 3.5. Зависимость скорости экстракции от продолжительности экстрагирования

### Контрольные вопросы

1. Приведите основные характеристики растворимости сырого воска в бензине БР-2.
2. Какие компоненты битумов относятся к смолам торфа?
3. Опишите последовательность процесса экстракции торфа с формулировкой его этапов.
4. Каким законом описывается процесс экстракции?
5. Расскажите об известных способах экстракции битумов.
6. Раскройте особенности основного способа экстракции, используемого в промышленном производстве торфяных битумов.
7. Расскажите о приборе и методике определения кинетических зависимостей процесса экстракции.

### 3.3. Заводской способ получения торфяного воска

Для получения торфяного воска используется верховой торф высокой степени разложения, удовлетворяющий требованиям республиканского стандарта РСТ БССР 659-85. При этом  $R > 30 \%$ ,  $A^c \leq 6 \%$ , содержание битумов – свыше 4 %. Указанными свойствами обладают следующие виды торфа: сосновый, сосново-пушицевый, сосново-сфагновый, пушицевый, пушицево-сфагновый и шейхцериевый.

Сырье, предназначенное для экстракции торфяного воска, может добываться фрезерным, резным или экскаваторным способом.

При выборе растворителя необходимо учитывать требования, подробно рассмотренные выше (см. п. 3.1).

Исходя из вышеуказанных требований и после предварительных исследований Институтом торфа Белоруссии был предложен в качестве растворителя для экстракции воска бензин БР-2 (ГОСТ 443-76). Следует отметить, что при применении этого растворителя достигается высокое качество «сырого» торфяного воска при минимальном содержании посторонних смол.

Сырой воск (ТУ-6-15-1228-80) имеет темно-коричневый цвет, температуру каплепадения 70–75 °С, плотность  $\rho = 1\,010 \text{ кг/м}^3$ , содержание смолистых веществ – не более 25–40 %, содержание воды – менее 0,15 %, содержание механических примесей – не более 1 %, кислотное число – 30–60 мг КОН/г, число омыления – 100–160 мг КОН/г, иодное число 15–30 г/100 г, сплавляемость с парафином полная.

Кроме сырого воска, после дополнительной химической переработки может быть получен обессмоленный воск. Из этого облагороженного продукта после операций рафинирования и этерификации изготавливают модифицированные виды воска и побочные продукты. Переработка торфа осуществляется в приемном, подготовительном и экстракционном отделениях завода. Далее сырой воск направляется на приготовление модифицированных восков и побочных продуктов, а затем готовая продукция складировается. На заводе предусмотрена переработка отходов производства.

Структурная технологическая схема производства торфяного воска приведена на рис. 3.6.

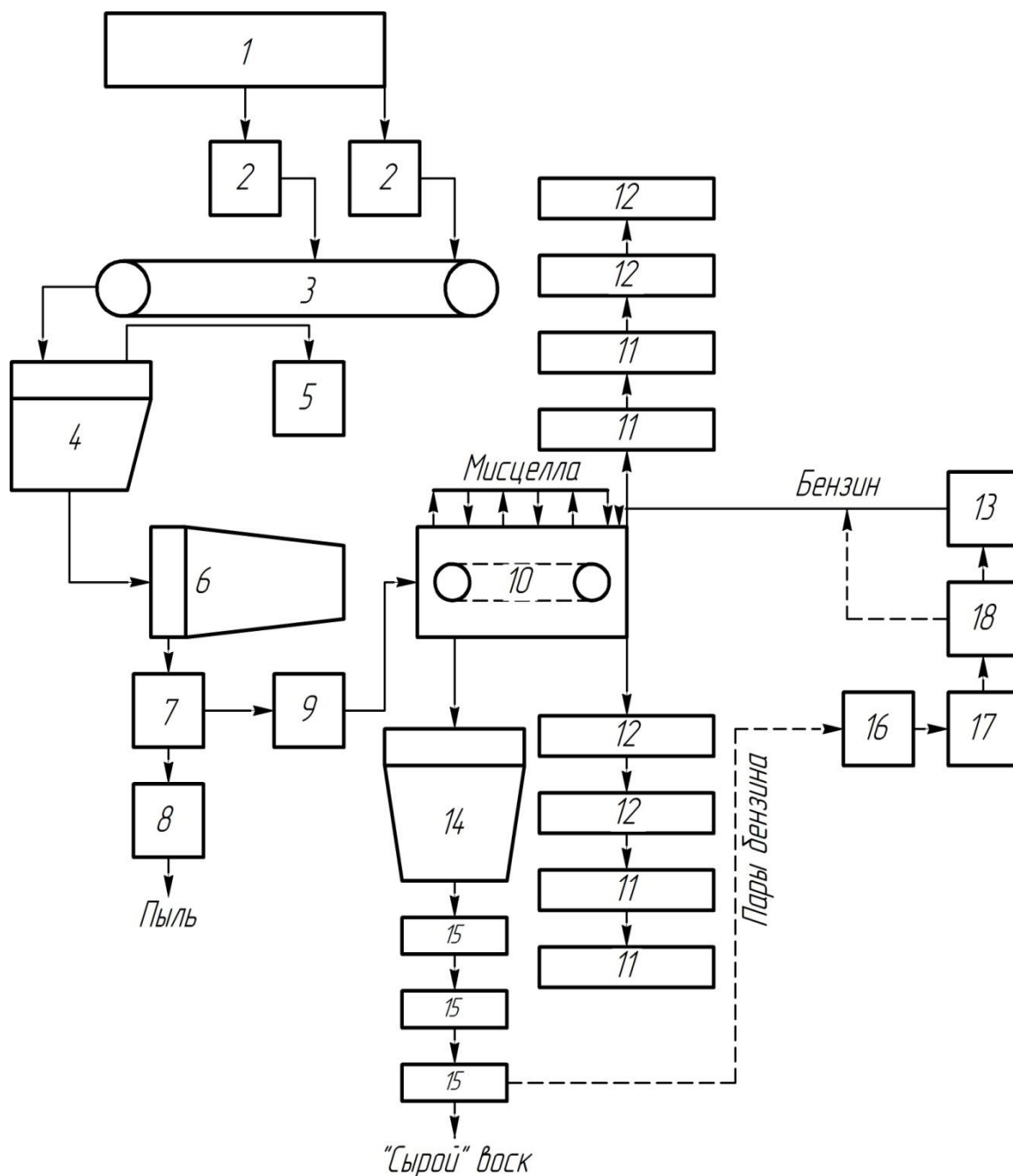


Рис. 3.6. Структурная технологическая схема получения торфяного воска: 1 – склад сырья; 2 – дробилка; 3 – конвейер; 4 – валково-дисковый грохот; 5 – бункер отходов; 6 – сушилка ПГБС; 7 – инерционный грохот; 8 – бункер пыли; 9 – бункер сушенки; 10 – экстрактор; 11 – испаритель; 12 – сушилка шнековая; 13, 18 – резервуар для бензина; 14 – сборник мисцеллы; 15 – система дистилляции; 16 – конденсатор; 17 – водоотделитель

В приемном отделении фрезерный или кусковой торф поступает в бункер пирамидальной формы. Сверху он накрыт сварной колосниковой решеткой с ячейками 100×100 мм. Крупные древесные включения и куски мерзлоты удаляются с решетки и после подсушивания используются в качестве топлива. В приемном отделении на специальных площадках располагаются емкости с химическими реагентами, необходимыми для получения обессмоленного и модифицированного воска.

На выход воска из торфа большое влияние оказывает его фракционный состав. Исследованиями установлено, что битумы, влага и минеральные соединения почти равномерно распределяются по фракциям переработанного торфа. Исключением из этого являются частицы крупностью менее 0,5 мм, имеющие повышенную зольность. Оптимальный размер частиц торфа перед экстракцией 0,5–5 мм. Крошка, полученная из кускового торфа, обладает более высоким качеством по сравнению с фрезерным торфом. Для обеспечения максимального содержания кондиционной фракции Институт торфа АН БССР было рекомендовано использование в качестве сырья кускового торфа с проведением его двухстадийного дробления: дробилкой со штифтовыми валками (крупность частиц не превышает 35 мм) и дробилкой ДГ-Ш. Для проектной производительности 3,5 т/ч оптимальный зазор в дробилке находится в пределах 9–10,3 мм.

Для сушки используется парогазовая барабанная сушилка ПГБС [50, 51]. В качестве теплоносителя применяется пар и отработанные топочные газы, поступающие из котлоагрегатов. Автоматическое регулирование влажности торфа в сушилке осуществляется влагомером Инсторфа АН БССР.

Сушильный агрегат оснащается также пылеулавливающей системой, состоящей из последовательно установленных одиночных циклонов ЦН-15У (диаметром 1,6 м) и ЦН-11 (диаметром 1,1 м). Необходимо подчеркнуть, что при проектировании современных цехов по производству воска целесообразно использовать более надежные и производительные сушилки (шахтно-мельничные, с виброкипящим слоем и др.).

В экстракционном отделении завода осуществляются операции термохимической переработки торфа [52]:

- экстракция торфяного воска бензином БР-2 при температуре около 80 °С с получением 2%-й мисцеллы;

- отгонка бензина из мисцеллы и возвращение его в цикл;

- отгонка бензина из проэкстрагированного торфа паром с температурой 150–180 °С;

- рекуперация бензина из паровоздушной смеси;

- кристаллизация и дробление «сырого» воска или его формовка и затаривание в мягкие контейнеры.

Экстракция воска происходит в горизонтальном ленточном экстракторе при взаимодействии торфа с растворителем в два этапа:

проникновение растворителя в поры твердого тела, его смачивание и растворение извлекаемого компонента;

диффузия растворимого компонента из частиц торфа в растворитель – образование мисцеллы.

Установлено, что скорость диффузии мисцеллы из частиц торфа зависит от физико-механических свойств среды и извлекаемых веществ. Обычно этот процесс интенсифицируется увеличением температуры среды и поверхности частиц торфа. В экстракторе поддерживается небольшое разряжение (в пределах 10–100 кПа).

Оптимальная температура среды рекомендуется на 2–5 °С ниже точки кипения бензина. При осуществлении реакции под давлением и с температурой среды выше оптимальной качество воска ухудшается. Это происходит прежде всего из-за попадания в него веществ невосковой природы.

Для промышленных условий рекомендуется оптимальное содержание влаги в торфе в пределах 20–30 %.

Слой торфа после прохода зоны слива растворителя (в конце ленты экстрактора) разрыхляется, а затем направляется в промежуточный бункер. На выходе из бункера проэкстрагированный торф подается в шнековые испарители. В этих испарителях происходит частичная отгонка бензина из торфа, а окончательная отгонка происходит в шнековых сушилках при подаче пара с температурой до 180 °С.

Из шнековых сушилок торф системой пневмотранспорта подается в отделение по производству топливных брикетов, торфощелочных реагентов и других продуктов.

Вытекающая из экстрактора мисцелла собирается в отстойнике и поступает на трехступенчатую систему дистилляции, работающую под разряжением 50–80 кПа.

После третьей ступени дистилляции «сырой» торфяной воск направляется в сборник, затем в горячем состоянии при температуре 100–105 °С самотеком проступает в охлаждаемую емкость. После кристаллизации воск подвергается дроблению и упаковывается в полиэтиленовые мешки.

Растворитель не отводится после технологического цикла в хранилище, а после конденсации и очистки в водоосадителе используется повторно для обработки свежих порций торфа.

Экстракция смолистых веществ осуществляется методом пятикратного взаимодействия дробленого «сырого» воска с растворителем, имеющим температуру 5 °С. После четвертого и пятого настаивания «сырого» воска в экстракторе растворитель полностью отгоняется из извлеченных

смолистых веществ. Для этих целей растворитель продувается паром. Завершением операции продувки является отсутствие бензина в конденсате.

В соответствии с технологическим регламентом может производиться обессмоленный воск с содержанием восковых веществ (90–91 %), парафинов (3–4 %) и смол (4–5 %). Регулирование процесса обессмоливания осуществляется по основным параметрам: температура, время, вид растворителя.

Модифицированный воск получается при облагораживании обессмоленного торфяного воска при помощи операций этерификации и рафинирования.

Процесс этерификации заключается в обработке обессмоленного воска окисляющими агентами: хлор, хромовая или азотная кислоты. Конечным продуктом процесса является рафинированный воск светлого цвета. Последующая химическая обработка рафинированного воска многоатомными спиртами позволяет создавать различные модификации воска.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите о требованиях, предъявляемых к торфяному сырью для получения битумов.
2. Дайте характеристику отделениям завода для получения торфяных битумов.
3. Приведите структурную технологическую схему получения торфяного воска.
4. Дайте краткую характеристику основному технологическому оборудованию, используемому для заводского получения торфяных битумов.
5. Какие процессы происходят в экстракционном отделении завода по производству битумов? Назовите основные параметры этих процессов.
6. Какое понятие вкладывается в термин «модифицированный торфяной воск»?

### **3.4. Модификация торфяного воска**

Особенностью сырого торфяного воска, получаемого путем экстракции бензином БР-2 верхового хорошо разложившегося битуминозного торфа, является наличие в его составе 25–45 % смолистых веществ. Они обладают высокой дуктильностью<sup>4</sup> и хорошо растворяются в большинстве органических растворителей. Восковая и смолистая части различаются по своему химическому составу. Как отмечено выше, их соотношение в «сы-

---

<sup>4</sup> Дуктильность – способность битума растягиваться в тонкую нить под влиянием приложенной силы.

ром» воске зависит от вида торфа, степени его разложения, применяемого растворителя и ряда других факторов. Воска относятся к соединениям жирного ряда, смолы – большей частью к циклическим и гидроароматическим соединениям. Известно, что восковая часть (или обессмоленный воск) состоит преимущественно из смеси высших парафиновых углеводов, жирных кислот и их эфиров с высшими алифатическими спиртами. Последние могут содержаться также и в свободном состоянии.

До настоящего времени нет единого четкого определения термина «смола». Ряд исследователей подразумевают под смолистой частью воска вещества, экстрагируемые из сырого торфяного воска органическими растворителями. Но так как при обессмоливании применяются различные растворители, их состав не идентичен. Так, Грефе [43, 46] за смолы принимает вещества, растворимые в эфире или ацетоне при комнатной температуре. Асroud [46] смолами считает вещества, растворимые в метаноле, а Gawley [38, 48] предлагает извлекать смолы этиловым эфиром уксусной кислоты. Традиционно при исследовании состава сырого торфяного воска и его компонентов проводят их разделение на восковую и смолистую части. В результате обессмоливания в последнюю переходят вместе со смолами также вещества, условно называемые парафинами [46].

За восковую часть принимаются вещества, кристаллизирующиеся из бензинового раствора при 0 °С. Смолы – вещества, растворимые в бензине при –20 °С или в ацетоне при –10 °С. К парафинам относят соединения, нерастворимые в бензине и ацетоне при этих же температурах.

Смолистая часть сырого торфяного воска снижает температуру плавления, придает ему липкость и окрашивает в темный цвет. Это ограничивает его применение в ряде производств. Кроме того, для получения высших марок восков (рафинированного, этерифицированного и других синтетических восков) неизбежно обессмоливание сырого торфяного воска.

В настоящее время известен ряд методов обессмоливания, в результате которых получают обессмоленный воск с минимальным содержанием смолистых веществ (1–3 %) и максимальной температурой каплепадения (82–84 °С). При этом в большинстве случаев происходит значительная потеря (15–30 %) восковой части, которая в определенных условиях (температуры, растворителя, метода обессмоливания) экстрагируется вместе со смолами, увеличивая их выход. Об эффективности процесса обессмоливания судят по количественному содержанию в обессмоленном воске смолистых веществ, а в смолистой части – воска.

Исследованием возможности обессмоливания торфяных и бурогольных восков занимались в 50–70 гг. XX века в Институте химической технологии АН УССР, в Московском химико-технологическом институте им. Д.И. Менделеева (в настоящее время это Российский химико-технологический университет) и других организациях. Разработанные методы можно свести к следующим [49, 53]:

1) сырой воск растворяется при нагревании в органических растворителях, а выкристаллизовавшийся при охлаждении раствора воск отделяется от смолистой части фильтрованием;

2) раздробленный сырой воск интенсивно смешивается при комнатной температуре с растворителем, хорошо растворяющим смолистую часть; нерастворившийся воск отфильтровывается;

3) раздробленный до определенного размера зерна и отсеянный от пыли сырой воск промывается растворителем при температуре, при которой растворяются только смолы и парафины.

Обессмоливание буроугольного воска в промышленных условиях налажено в Чехии и Германии, где обессмоленный воск является исходным продуктом для получения рафинированного и этерифицированного восков. В Чехии обессмоливание буроугольного воска проводится путем 7–8-кратного настаивания восковой крошки с бензолом при температуре 20–25 °С в течение 1–2 ч. Для того чтобы избежать склеивания, крошку предварительно смешивают с древесными опилками в соотношении 15:1. Сущность процесса обессмоливания, применяемого в Германии, состоит в обработке (путем перемешивания) сырого буроугольного воска смесью хлороформа и метанола (1:1) при нормальной температуре в течение 3–4 ч. В нашей стране в опытных масштабах получали обессмоленный воск для применения его как товарного продукта в различных отраслях промышленности. Институтом теплоэнергетики АН УССР предложен метод обессмоливания, основанный на кристаллизации воска из дихлорэтана или смеси с этанолом при 0–2 °С [38, 43, 46].

В Институте торфа АН БССР в 1970-х гг. изучалась возможность обессмоливания сырого торфяного воска двумя методами: кристаллизацией из мисцеллы и путем селективного разделения при низких температурах. В результате экспериментов по оценке эффективности первого метода [54] установлено, что этот метод позволяет получить обессмоленный воск высокой степени чистоты (97–98 %) непосредственно из мисцеллы, и это при том, что извлечение достигает 85 %. Содержание воска в смоле варьируется от 8 до 28 %. В зависимости от условий кристаллизации выход воска колеблется от 40,7 до 63,6 %, смолы – от 34,5 до 56,0 %. Приведенные данные показывают, что, несмотря на минимальное количество смолистых веществ в обессмоленном воске, потери его при обессмоливании методом кристаллизации значительны.

Второй метод обессмоливания основан на селективном растворении смолистой части воска органическими растворителями при низких температурах [6]. При этом изучалось влияние растворителей, времени, размера зерна и температуры на данный процесс.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем: измельченный сырой торфяной воск загружался в экстрактор – цилиндр с ложным сетчатым дном, краном для слива растворителя и «рубашкой» для



термостатирования. Растворитель поступал в реактор снизу. Восковая крошка с растворителем настаивались 5 ч при пятикратном сливе последнего через час. После каждой экстракции раствор смолы собирался отдельно, растворитель отгонялся, остаток доводился в вакууме до постоянной массы. В результате выполнения этих операций устанавливалось количество извлекаемых смолистых веществ. В обессмоленном воске определялось содержание смолистых веществ (смолы и парафины), температура каплепадения и числа (кислотное<sup>5</sup>, эфирное<sup>6</sup>, омыления<sup>7</sup> и иодное<sup>8</sup>). Объектом исследования служил сырой торфяной воск (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Характеристика сырого торфяного воска

Показатель	Величина
Температура каплепадения, °С	74
Содержание воска, %	57
Содержание смолистых веществ, %, в том числе:	42
смол	25
парафинов	17
Кислотное число	49
Эфирное число	26
Число омыления	75
Иодное число	30
Вязкость при 100 °С, спз	53
Плотность при 100 °С, кг/м <sup>3</sup>	880

### Влияние растворителей

В качестве растворителей испытаны бензин БР-1, дихлорэтан, ацетон, бутилацетат, метанол, Н-бутанол и их смеси, а также бензин с введением лишь в последнюю стадию обессмоливания кислородсодержащих растворителей. Время контакта сырого воска с растворителем во всех экспериментах оставалось постоянным. Минимальное содержание смол достигнуто при обессмоливании дихлорэтаном, ацетоном, смешанными растворителями, а также бензином с добавкой на последней стадии экстрак-

<sup>5</sup> Кислотное число – количество миллиграмм гидроксида калия (КОН), необходимое для нейтрализации всех кислых компонентов, содержащихся в 1 г исследуемого вещества.

<sup>6</sup> Масса КОН (мг), необходимая для омыления всех сложных эфиров, содержащихся в 1 г органического вещества.

<sup>7</sup> Число омыления (или число Кэттстерфера) – количество миллиграммов КОН, необходимое для нейтрализации свободных кислот и омыления сложных эфиров, содержащихся в 1 грамме исследуемого вещества.

<sup>8</sup> Иодное число – масса иода (г), присоединяющегося к 100 г органического вещества.

ции незначительного количества кислородсодержащих соединений: спиртов, кетонов, эфиров.

При обессмоливании только бензином в обессмоленном воске остается около 3 % смол. Почти такие же результаты получены и при обессмоливании бутилацетатом и *n*-бутиловым спиртом. Образцы обессмоленного различными растворителями воска различаются по температуре каплепадения (78–83 °С). Максимальная температура каплепадения (83 °С) отмечается при обессмоливании смесью бензина и бутилацетата в соотношении 3:1; бензина, бутилацетата и ацетона (3:1:1); бензина и *n*-бутанол (3:1).

Экспериментально установлено, что растворители, содержащие в своем составе гидроксильную группу, дают в результате обессмоливания наиболее низкоплавкие воски. Максимальное количество растворившихся веществ (смолистая часть) получается при обессмоливании смесями бензина и *n*-бутилового спирта (61,6 %); бензина, бутилацетата и ацетона (60,2 %); бензина и бутилацетата (57,0 %). Значительно меньше смол извлекается бутилацетатом (47,6 %), дихлорэтаном (43,2 %), смесью бензола и ацетона (41,7 %). Бензин извлекает 26,6 % смол, а метанол – 13,1 %. Экспериментальные данные позволяют утверждать, что при обессмоливании некоторыми растворителями вместе со смолами теряется значительное количество воска. Оптимальным растворителем является бензин.

#### **Влияние физических факторов на процесс обессмоливания**

Для изучения влияния размера зерна обессмоливание проводили при постоянной температуре (0–3 °С) и времени (5 экстракций по одному часу). Экспериментально установлено, что с увеличением размера зерна выход обессмоленного воска возрастает от 62 до 79 % за счет повышения содержания смолистых веществ от 4,4 до 10,5 %. Наиболее удовлетворительные данные получены при обессмоливании сырого воска с размером зерна 1–3 мм.

Влияние продолжительности экстракции на процесс обессмоливания изучалось при температурах 0–3 °С и 15–17 °С. Размер зерна в этих экспериментах составлял 1–3 мм. В результате проведенных исследований установлено, что смолистой части извлекается тем больше, чем больше первоначальное время контакта растворителя с раздробленным воском. При температуре 15–17 °С извлечение достигает 28,3–44,8 %. При низкой температуре (0–3 °С) время меньше влияет на процесс. В этом случае количество извлекаемых смол увеличивается от 22,4 до 28,7 %. Соответственно меняется и выход обессмоленного воска. Если при температуре 0–3 °С минимальный выход восковой части был равен 71,3 %, а максимальный – 77,6 %, то при температуре 15–17 °С количество извлеченной смолистой части составило соответственно 55,2 и 71,7 %. Увеличение выхода восковой части ухудшает ее качество.

Таким образом, наиболее подходящее время обессмоливания при температуре 0–3 °С составляет 5 ч при пятикратном сливе раствора через каждый час или три экстракции по 1,5 ч. При этом уменьшение времени приводит к неполному извлечению смол, а увеличение – к потере воска, уходящего в смолистую часть.

При температуре 15–17 °С для достижения равного с предыдущим эффекта достаточно пяти экстракций при сливе растворителя через каждые 0,5 ч.

Температура обессмоливания значительно влияет на выход и качество обессмоленного воска (табл. 3.13). Наблюдается прямая зависимость между температурой и извлечением смолистых веществ (табл. 3.14): при снижении температуры с 15 до –10 °С выход их падает с 40 до 21 %. При температуре 15–10 °С вместе со смолами извлекается значительное количество воска. При температурах, близких к 0 °С и ниже, потерь воска практически не наблюдается.

Таблица 3.13

Влияние температуры на выход и характеристику обессмоленного воска

Температура, °С	Выход, % к сырому воску	Температура каплепадения, °С	Содержание в обессмоленном воске, %			Число			
			Воск	Смолистая часть		кислотное	эфирное	омыления	иодное
				Парафины	Смолы				
15	59,6	81,0	94,4	2,2	1,0	55	74	130	11
10	66,0	80,0	93,9	2,9	1,2	54	68	123	12
5	70,5	78,5	93,1	3,1	2,5	55	68	123	14
0	73,5	78,0	91,1	3,4	3,2	54	68	122	17
–5	44,0	77,5	80,2	8,3	5,3	51	64	115	20
–10	79,4	76,0	78,3	10,1	7,8	52	62	112	23

Таблица 3.14

Влияние температуры на количество извлеченных смолистых веществ

Температура, °С	Количество извлеченных смолистых веществ после экстракции, % от сырого воска					
	1-я экстракция	2-я экстракция	3-я экстракция	4-я экстракция	5-я экстракция	Всего
15	30,1	4,0	4,0	1,5	0,8	40,4
10	19,0	7,0	4,2	2,0	1,8	34,0
5	17,7	5,4	2,9	2,1	1,4	29,5
0	13,8	4,3	2,7	2,9	2,3	26,0
–5	12,1	5,3	2,8	1,6	1,2	23,0
–10	8,4	6,4	2,8	2,1	0,8	20,5

В температурном интервале от 0 до  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  разница (за первый час экстракции) в выходе смолистой части незначительна. При температуре ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  смолистые продукты извлекаются не полностью. Некоторое их количество остается в восковой части. Фактические данные показывают, что оптимальная температура обессмоливания находится в диапазоне  $0-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В прил. 7 приведены данные по составу смолистой части, полученной в результате обессмоливания сырого торфяного воска при различных температурах.

Таким образом, оптимальные параметры режима обессмоливания наблюдаются при размере зерна 1–3 мм, температуре  $0-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , времени 5 ч при пятикратном сливе растворителя. Обессмоленный воск, полученный в этих условиях, характеризуется данными, приведенными в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Характеристика обессмоленного торфяного воска

Показатель	Величина
Температура каплепадения, $^{\circ}\text{C}$	81
Содержание воска, %	88,2
Содержание смолистых веществ, %, в том числе:	10,9
смола	5,0
парафинов	5,9
Кислотное число	56
Эфирное число	56
Число омыления	112
Иодное число	13,0
Вязкость при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , спз	70
Плотность при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{кг/м}^3$	900

На основании результатов лабораторных исследований разработан промышленный метод обессмоливания, который используется на заводе горного (торфяного) воска «Дукора» (Белоруссия).

**Контрольные вопросы**

1. Приведите данные различных исследователей по составу смол торфяных битумов.
2. Какие методы обессмоливания торфяного воска вам известны?
3. Расскажите о методах обессмоливания воска, применяемых за рубежом.
4. Какое влияние на процесс обессмоливания торфяного воска оказывают различные виды растворителей?
5. Какие физические факторы влияют на процесс обессмоливания?
6. Приведите основные характеристики обессмоленного торфяного воска.

### 3.5. Этерификация торфяного воска

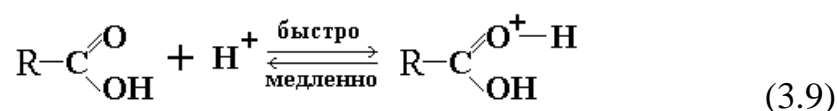
Темная окраска и высокое содержание смол ограничивают применение сырого торфяного воска в таких отраслях промышленности, где требуется светлый восковой продукт с высокой температурой плавления. В связи с этим возникает необходимость облагораживания сырого бурого торфяного и торфяного восков до светлых, не темнеющих при сплавлении продуктов.

В результате обработки обессмоленного воска окисляющими агентами (хлор, хромовая, азотная кислоты и т. д.) получается рафинированный воск светлого цвета, который вследствие высокого содержания свободных органических кислот кристаллизуется при применении его в обувных кремах и мастиках, что можно устранить, если карбоксильные группы свободных органических кислот в отбеленном воске превратить в другие группы, содержащие комплекс  $-CO-$ . Они могут быть полностью или частично этерифицированы<sup>9</sup> спиртами.

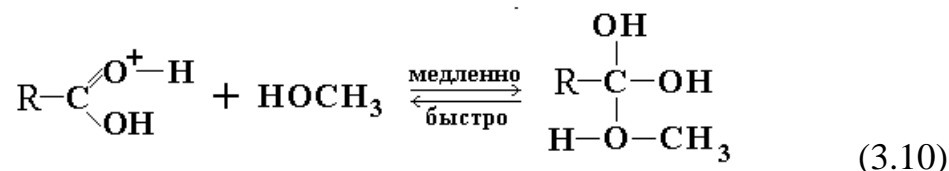
Взаимодействие органических кислот и спиртов – один из основных способов получения сложных эфиров. Эта реакция протекает медленно и обычно не доходит до конца. Она является обратимой: вода разлагает сложный эфир с образованием исходных веществ – кислоты и спирта.

Механизм образования сложных эфиров из органических кислот и спиртов долгое время не был выяснен до конца. Считалось, что от кислоты отщепляется водород, а от спирта – гидроксил. Однако исследования, проведенные с применением изотопов, показали, что все происходит наоборот: водород отщепляется от спирта, а гидроксил – от кислоты.

Изучение кинетики этерификации [46] позволило выявить несколько различных путей, по которым может идти этот процесс. В быстрой стадии протон атакует отрицательно поляризованный атом кислорода карбоксильной группы:

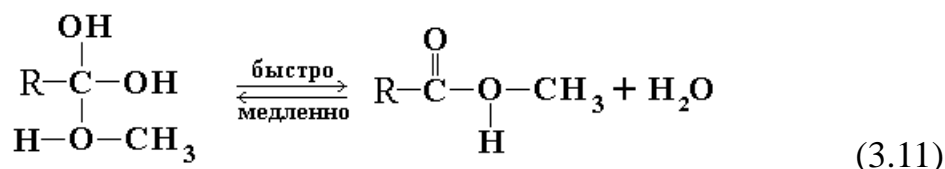


образуя ион оксония, который затем медленно реагирует со спиртом:

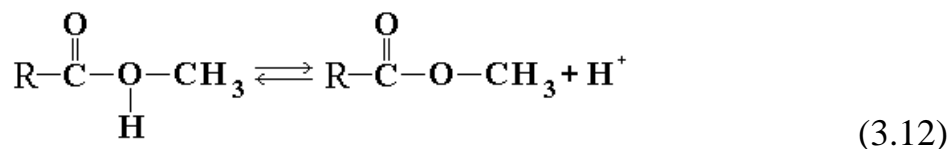


В результате происходит отщепление воды:

<sup>9</sup> Этерификация – реакция образования сложных эфиров при взаимодействии кислот и спиртов.



а затем протона:



и образуется сложный эфир.

Стадией, определяющей скорость реакции этерификации, является бимолекулярная атака спиртом протонизированной кислоты (формула 3.10). Медленной стадией реакции гидролиза является атака водой протонизированного эфира. Этот процесс известен как механизм  $A_{ac} 2$ , где  $A$  указывает, что реакция катализируется кислотами; цифра 2 обозначает порядок реакции;  $ac$  – ацильное расщепление, то есть разрыв связи  $C-O$  в кислоте или связи  $C-OCH_3$  в эфире. Активность карбонильной группы незначительна, поэтому карбоновые кислоты реагируют со спиртами медленно. Реакционная способность этой группы основывается на ее полярности. Углеродный атом ее имеет кислотный (электрофильный) характер, а кислородный – основной (нуклеофильный) характер. Скорость присоединения по карбонильной группе тем выше, чем более нуклеофилен реагент, то есть чем больше его основность. Поэтому, например, эфиры и амиды омыляются гораздо быстрее ионами гидроксила, чем менее основной водой.

На реакции карбонильной группы сильное влияние оказывают катализаторы. Можно заранее предвидеть, что все кислотные катализаторы будут увеличивать полярность карбонильной группы, поскольку эти катализаторы могут реагировать с основным карбонильным кислородным атомом. В результате взаимодействия с катализатором (оно не обязательно приводит к образованию химической связи!) оттягивание электронов от нуклеофильного агента естественно увеличивается.

Скорость этерификации кислот возрастает с увеличением положительного заряда их карбонильного атома углерода, то есть с ростом силы кислоты.

Сильное влияние на этерификацию оказывают пространственные факторы. С ростом объема алкильных остатков, связанных с карбоксильной группой, и увеличением радикала в этерифицирующем спирте скорость этерификации снижается. Трудности возрастают и по мере перехода от первичных к третичным спиртам. Как показали исследования Н.А. Меншуткина [46], скорость и предел этерификации для разных спиртов различны: наибольшие – для первичных, наименьшие – для третичных.

В условиях этерификации (сильнокислая среда) одновременно возрастает склонность к образованию простых эфиров или олефинов из спиртов.

Для сложных эфиров можно использовать в качестве исходных веществ также и эфиры соответствующей кислоты с другими спиртами. Подобный алкоголиз эфиров карбоновых кислот носит название переэтерификации. Этот процесс может катализироваться как кислотами, так и щелочами [6, 8].

Производство кремов, политуры для натирания полов, пропитывания упаковочных материалов и пр. вызывает повышенный спрос на воски с улучшенными специфическими свойствами (светлая окраска, низкое кислотное число). Исходным продуктом для воска с такими свойствами является рафинированный воск, восковые кислоты которого этерифицируются различными гликолями. При этерификации рафинированного буроугольного монтан-воска (воск S) этиленгликолем получается этерифицированный воск (воск E), который имеет желтую окраску. Благодаря своим свойствам он применяется для получения обувных кремов, пропитывания бумаги.

Этерификацией воска пропиленгликолем получается воск EG, по своим свойствам подобный воску E. Воск EG хорошо эмульгируется. Он подходит для производства гляncованной бумаги. Воски KP, KPS и FP являются этерифицированными и получены при окислении смеси сырого и обессмоленного воска. Широко применяются омыленные воски: O, OP, AD. Воск O получается при этерификации этиленгликолем и затем омыляется  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Он коричневого цвета, очень твердый, имеет раковистый излом. Его связующая способность превосходит все природные воски. Воск O – хороший заменитель карнаубского воска<sup>10</sup> при получении полировочных материалов.

Воск OP подобен воску O. Он получается при этерификации воска S бутиленгликолем и омылением  $\text{CaO}$ . Воск AD получают при этерификации воска пропиленгликолем и последующим омылением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Имеется группа комплексных и мягких восков. К комплексным относится воск Special, который получается в результате этерификации сырого и обессмоленного монтан-воска бутиленгликолем с последующим омылением  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  солями и добавлением 8%-го G-гликоля.

К группе мягких восков принадлежит воск VI. Кроме воска S, сюда добавляются жирные кислоты с низкой точкой плавления, содержащие 14–18 атомов углерода. Смесь этерифицируется этиленгликолем. Вносятся также парафин, ланолин и эфир коричной кислоты, который придает запах пчелиного воска. Он служит главным образом как заменитель

---

<sup>10</sup> Карнаубский воск – воск из листьев пальмы *Copernicia cerifera*, произрастающей в северо-восточных штатах Бразилии: Пиауи, Сеара и Риу-Гранди-ду-Норти. Зарегистрирован в качестве пищевой добавки E 903.

пчелиного воска. Кроме того, его применяют для приготовления косметических препаратов и мазей [49].

Исследованиями, проведенными в 1970-х гг. в Институте торфа АН БССР, установлено, что торфяной воск, обладающий специфическими свойствами, может заменить пчелиный, карнаубский и буроугольный во многих отраслях промышленности (производство кремов, паст, эмульсий, пластмасс).

Для создания модифицированных восков с заданными свойствами разработаны методы производства синтетических этерифицированных восков (изучен процесс этерификации торфяного рафинированного воска многоатомными спиртами с удлиненной и разветвленной углеродной цепью).

Процесс этерификации осуществляли по следующей методике: 100 г рафинированного торфяного воска загружали в четырехгорлую колбу, снабженную термометром, механической мешалкой и отверстиями для создания тока газа, обеспечивающего удаление реакционной воды. Колба с воском помещалась в глицериновую баню. После расплавления воска в колбу подавался азот. Затем включалась мешалка, добавлялись этерифицирующий агент и катализатор. Контроль осуществлялся по изменению кислотного числа воска во времени.

Реакция этерификации обратима и протекает до установления равновесия системы. Однако равновесие в этом случае не особенно благоприятно для технологического процесса. В соответствии с законом действия масс его можно сдвинуть вправо, применяя одно из исходных веществ в избытке или постоянно удаляя из реакционной смеси продукты реакции: воду или сложный эфир. При работе с большими количествами, когда имеет значение расход спирта и выход продукта, прибегают к различным методам удаления образующейся воды. Довольно часто применяют азеотропную<sup>11</sup> отгонку. В этом случае выбор растворителя, с которым отгоняется вода, производится с учетом температуры кипения самого низкокипящего компонента. При экстрактивной этерификации образующийся эфир удаляют из реакционной смеси с помощью растворителя, который хорошо растворяет сложный эфир, но очень плохо воду [49].

В Институте торфа АН БССР изучались различные методы удаления воды при этерификации торфяного воска:

азеотропная отгонка с толуолом и четыреххлористым углеродом,

отгонка воды через холодильник,

удаление воды током газа (азот, воздух).

В исследованиях использовался торфяной рафинированный воск с кислотным числом 150, температурой каплепадения 81 °С, вязкостью  $\eta_{100} = 22,9$  спз, плотностью  $\gamma = 877$  кг/м<sup>3</sup>. В качестве этерифицирующего

---

<sup>11</sup> Азеотропная смесь – смесь двух или более жидкостей, состав которой не меняется при кипении, то есть смесь с равенством составов равновесных жидкой и паровой фаз.



агента применялся этиленгликоль. Данные кинетического контроля над процессом (по кислотным числам) при различных способах удаления воды приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Влияние способа удаления воды на качество  
этерифицированного торфяного воска

Способ удаления воды	Кислотное число				Температура каплепадения, °С
	3 ч	6 ч	9 ч	12 ч	
По методу Фишера	56,0	31,2	26,0	21,0	75,0
Отвод Н <sub>2</sub> О через холодильник	33,7	23,2	18,3	16,7	77,5
Азеотропная отгонка с толуолом	31,1	23,2	18,0	16,6	78,0
Азеотропная отгонка с четыреххлори- стым углеродом	25,9	18,5	16,8	14,6	78,5
В токе газа	30,0	15,6	13,1	10,4	78,5

Анализ экспериментальных данных (см. табл. 3.16) позволяет сделать вывод, что при удалении реакционной воды увеличивается эффективность процесса этерификации торфяного воска. Поэтому наиболее целесообразно проводить этерификацию в токе газа. В этом случае из продуктов реакции удаляется вся образуемая вода и получается сухой этерифицированный воск, температура каплепадения которого на 3 °С выше, чем у воска, полученного по методу Фишера.

Для превращения всей кислоты в эфир нужно увеличивать количество спирта, так как при этом усиливается сдвиг реакции этерификации в сторону образования сложного эфира.

При экспериментах с рафинированным воском таких же характеристик, что и в предыдущем случае, в качестве этерифицирующих агентов использовались этиленгликоль, 1,4-бутиленгликоль, смеси этилена с 1,4-бутиленгликолем (1:1; 2:1), пропиленгликоль, глицерин и пентаэритрит. Катализаторами процесса служили серная кислота или паратолуолсульфокислота.

С целью оценки влияния спирта на ход процесса этерификации количество спирта составляло 90, 100, 140, 160 и 200 % от теоретически необходимого, рассчитанного по кислотному числу исходного рафинированного воска. В результате опытов было установлено, что оптимальным для реакции является 120–140 % гликоля.

Если же процесс этерификации происходит с теоретически необходимым количеством 1,2-пропиленгликоля, то реакция идет очень медленно в течение 13–15 ч. Причем уже через 3 ч воск приобретает темный цвет. При увеличении содержания 1,2-пропиленгликоля в два раза реакция значительно ускоряется, а дальнейшее увеличение его количества ведет лишь к незначительной интенсификации процесса.

При исследовании влияния глицерина и пентаэритрита на процесс этерификации торфяного воска [46] было отмечено образование сетчатой структуры получаемого продукта: он становится тягучим и приобретает темный цвет. Экспериментально установлено: оптимальное количество глицерина составляет 500 % и пентаэритрита 500–700 % на 100 г рафинированного воска.

Для определения оптимального температурного режима реакции этерификации торфяного воска был проведен ряд экспериментов [43, 45, 46] с оптимальным расходом этерифицирующих агентов при температурах 95–125 °С с шагом 5 °С. В них было установлено, что уменьшение температуры ниже 100 °С приводит к торможению реакции вследствие недостаточного количества выделяемой воды. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что температура реакции этерификации торфяного воска гликолями не должна превышать 120 °С, так как при более высокой температуре воск начинает темнеть.

Процесс этерификации торфяного воска трехатомным (глицерином) и четырехатомным (пентаэритритом) спиртами протекает медленнее. В этом случае оптимальная температура должна быть несколько выше 125–130 °С.

При промышленном использовании восков производится их расплавление, поэтому изучение их физических характеристик в жидком состоянии является актуальной задачей. Вязкость – одна из важнейших характеристик жидкостей, которая зависит от изменения химического состава и температуры. Определение вязкости производится при помощи различных типов вискозиметров. Наиболее распространены из них капиллярные, а также устроенные по принципу падающего шара (при температуре 90–150 °С с интервалом 10 °С).

Анализ полученных экспериментальных данных с торфяными восками, этерифицированными 1,2-пропиленгликолем, глицерином и пентаэритритом свидетельствует о том, что их вязкость возрастает по мере увеличения основности спирта. Например, вязкость восков, полученных при этерификации четырехосновным спиртом (пентаэритритом), в 3–4 раза больше вязкости восков, этерифицированных двухосновными спиртами.

### **Контрольные вопросы**

1. Получение каких продуктов из торфяного воска основано на процессе этерификации?
2. Приведите основные кинетические зависимости процесса этерификации.
3. Сделайте оценку влияния каталитических систем на процесс этерификации.
4. Расскажите о различных методах удаления воды при этерификации торфяного воска.
5. Дайте оценку влияния спиртов на ход процесса этерификации.
6. Приведите оптимальные температурные параметры и режимы при получении обессмоленного торфяного воска.

## **4. ХАРАКТЕРИСТИКА САПРОПЕЛЕЙ**

Сапропелем называются тонкоструйные коллоидальные отложения пресноводных водоемов с содержанием органического вещества в пересчете на сухую массу не более 15 %. В некоторых литературных источниках [55] указывается, что предел содержания органических компонентов может быть снижен до 10 %. Впервые термин «сапропель», что в переводе означает «гниющий ил», был предложен немецким болотоведом Р. Лаутерборном [56] в 1901 г. для обозначения темных, пахнущих сероводородом отложений мелких водоемов с восстановительными условиями у дна и со значительным содержанием в воде кальция. В 1904 г. Г. Потонье [56] употребил этот термин для обозначения всех иловых отложений пресноводных водоемов. Сапропелем он назвал отложения мелководной или глубинной части водоема, богатые жирами и белками отмирающего планктона, претерпевающие процесс битуминизации в придонной анаэробной среде.

На основе противопоставления наиболее общих свойств сапропелей, с одной стороны, и торфа и минералогенных озерных осадков – с другой, предлагается следующее понятие сапропеля: «Сапропель – это современные тонкоструйные коллоидальные отложения континентальных водоемов, содержащие значительное количество органического вещества и оформленных остатков микроскопических водных организмов, некоторое количество неорганических компонентов биогенного происхождения и минеральных примесей проносного характера» [55].

Основной состав органического вещества сапропелей формируется из остатков растительных и животных организмов, обитающих в водоеме. Состав минеральных компонентов зависит от условий питания, химического состава питающих водоемы вод и эрозивных процессов. В результа-

те физических, химических и биологических реакций, протекающих в осадке, сапропели обогащаются многими микроэлементами и биологически активными веществами (см. прил. 4).

По условиям залегания разделяют открытые и погребенные сапропелевые отложения. Открытые отложения залегают в современных водоемах, процесс их накопления протекает до настоящего времени. Это развивающиеся сапропелевые месторождения. Над ними имеется лишь слой воды, из которого на поверхность залежи поступают новые порции органического и минерального материала, что ведет к увеличению мощности отложений.

Погребенные сапропели находятся под торфяной залежью, реже – под минеральными наносами, для которых стадия седиментогенеза уже закончилась. По мере обмеления и зарастания озер происходит постепенный переход от открытых сапропелевых месторождений к погребенным. Однако часто в почти совершенно заросших озерах остаются небольшие просветы воды, так называемые «окна», приуроченные к наиболее глубоким участкам. Хотя они уже не играют существенной роли в пополнении сапропелевых запасов, однако служат косвенным указателем месторождений сапропелей с наибольшей глубиной. Если суммарная площадь остаточных озер невелика по сравнению с общей площадью сапропелевых отложений, то такие месторождения нужно относить к погребенным.

Формы рельефа часто задают размеры и форму месторождения, условия водного и минерального питания, характер минерализации и строения залежи, мощность сапропелевых отложений и их развитие. На территории Восточно-Европейской равнины А.Я. Рубинштейн выделяет четыре основные группы месторождений: поймы; высокие террасы и зандровые равнины; холмисто-моренный ландшафт; возвышенные (сглаженные) равнины.

Сапропели, погребенные под торфом, практически не изучены. Средняя мощность их слоя составляет 0,9–1,3 м, достигая в отдельных месторождениях 2,8 м. Зольность залегающих под торфом сапропелей выше, чем у озерных, отмечается и большее содержание микроэлементов.

Внешне сапропель (см. прил. 4) имеет вид желеобразной однородной массы, консистенция которой в верхних слоях приближается к сметанообразной, а в нижних становится более плотной. Часто сапропель имеет мелкозернистую структуру. На его консистенцию сильно влияют минеральные примеси, придающие сапропелям характер глинистых, песчаных или известковистых образований.

Окраска сапропелей очень разнообразна, причем цвет играет большую роль при глазомерной оценке отложений, так как указывает на присутствие некоторых органических и неорганических компонентов: оливковый – хлорофилла, розовый – каротина или марганца, голубоватый – ви-

вианита, черный – железа, серый – глины или извести. Следует отметить, что естественную окраску сапропели имеют непосредственно после извлечения из залежи. Даже кратковременное воздействие воздуха существенным образом изменяет их окраску.

Сапропели в естественном состоянии представляют собой сложную многокомпонентную полидисперсную систему.

Согласно инженерно-геологической классификации горных пород (по В.Л. Саваренскому с изменениями и дополнениями В.Д. Ломтадзе [57]) сапропели можно отнести к пятой группе осадочных пород, то есть к группе осадочных пород особого состава, состояния и свойств. Горные породы этой группы характеризуются специфическими свойствами, требуют специальных методов исследований и индивидуальной оценки.

Для сапропелей характерны следующие стадии их естественного состояния.

1. Стадия суспензии. Верхний слой формируемого сапропеля (пелоген). Неустойчивая система характеризуется высоким влагосодержанием, большой подвижностью ионов, активно протекающими биохимическими процессами.

2. Стадия текучего состояния. В результате седиментации частицы образуют структурный осадок, который характеризуется высокой естественной влажностью.

В зависимости от плотности частиц и состава возможны различные формы коагуляции: гидрофобная с относительно плотным осадком или гидрофильная, дающая рыхлую структуру, вследствие чего влажность на этой стадии физического состояния осадка бывает различной.

3. Стадия пластического состояния. Сказывается гравитационное уплотнение осадка. Минерализация нижних слоев органических озерных отложений и дальнейшее их уплотнение приводят к тому, что осадок переходит в полутвердое состояние, характеризующееся значительной потерей слабосвязанной воды.

#### **4.1. Влажность**

Специфической особенностью сапропелей является высокое влагонасыщение в естественном состоянии. По аналогии с практикой, установившейся в торфоведении, содержание влаги в сапропеле выражают двумя показателями: относительной влажностью  $w$ , под которой понимается весовое количество влаги в сапропеле, выраженное в процентах к общему его весу, и абсолютной влажностью  $W$ , представляющей собой весовое содержание влаги, выраженное в процентах к сухому веществу сапропеля.

Первым показателем преимущественно пользуются при технологическом расчете.

Взаимный пересчет значений относительной и абсолютной влажности, %, производится по формулам:

$$w = \frac{100 W}{100 + W}; \quad W = \frac{100 w}{100 - w}.$$

Естественная влажность – количество воды, содержащееся в порах сапропеля в естественном его залегании. Определяется высушиванием образца в сушильном шкафу до постоянного веса при температуре 105–110 °С. Изменяется в широком диапазоне (от 150 до 3 000 %).

Верхний слой сапропелевой залежи, имеет более высокую влажность (2 500–3 000 %). Содержание влаги в залежи зависит от содержания органического вещества. Для сапропелей открытых водоемов характерно резкое понижение влажности с увеличением глубины отложений. Для погребенных сапропелей колебания влажности менее значительны [55]. Обычно влажность погребенных сапропелей изменяется в пределах 400–650 %, и только под воздействием грунтовых вод она может быть выше.

Наибольшее количество влаги, которую удерживает образец, взятый из залежи после свободного оттока гравитационной воды, характеризует полную влагоемкость сапропеля. Сапропели в естественном состоянии избыточно увлажнены, то есть их естественная влажность, как правило, выше полной влагоемкости (табл. 4.1). Так же как и естественная влажность, полная влагоемкость зависит от содержания органического вещества в сапропеле и в среднем колеблется от 1 300 (органические сапропели) до 700 % (кремнеземистые сапропели).

Гигроскопическая влажность сапропелей – влажность, которую сохраняют образцы на воздухе в обычных лабораторных условиях, – изменяется для органических сапропелей в пределах 9–11 %, для кремнеземистых и карбонатных – в пределах 5–8 %.

Водопроницаемость характеризует способность пористого материала пропускать через себя воду. Мерой водопроницаемости является коэффициент фильтрации  $K_f$ , который равен скорости движения воды при градиенте напора, равном единице.

Сапропели в естественном состоянии обладают фильтрационной анизотропией. По данным Н.В. Михальченкиной [60] коэффициент фильтрации для кремнеземистого сапропеля в вертикальном направлении равен 0,004 3 м/сут, а в горизонтальном направлении – 0,008 6 м/сут. Для карбонатного сапропеля эти значения соответственно равны 0,0008 6 и 0,043 м/сут.

Таблица 4.1

## Характеристики сапропеля

Озеро	Глубина отбора пробы, м	Естественная влажность	Полная влагоемкость	Гигроскопическая влажность	Максимальная молекулярная влагоемкость	Максимальная гигроскопическая влажность
<b>Органические сапропели</b>						
Погостское	1,0	2 477	1 513	9,75	123	–
Бобровицкое	3,0	2 588	1 484	9,54	120	–
Вечер	1,0	1 752	1 326	9,71	202	878
Сергеевское	Из отстойника	1 390	1 026	9,95	141	–
Олтушское	6,5	1 841	973	9,67	131	286
Безымянное	8,0	1 023	1 277	11,09	176	469
Среднее значение		1 845	1 266	9,55	149	–
<b>Кремнеземистые сапропели</b>						
Погостское	2,0	942	662	5,31	118	–
Бобровицкое	3,5	874	701	8,20	106	–
Воронь	Средняя проба	1 047	858	6,54	83	307
Луковское	5,5	592	583	7,92	103	133
Среднее значение		864	701	6,99	103	–
<b>Карбонатные сапропели</b>						
Вечер	2,0	462	383	6,18	80	162
Любань	10,7	463	378	4,55	72	228
Ореховское	5,5	1 804	1 394	,19	149	744
Среднее значение		909	718	6,30	100	–

Увеличение горизонтальной фильтрации объясняется слоистым строением отложений сапропеля. В образцах с нарушенной структурой величины вертикальной и горизонтальной фильтрации почти одинаковы. В табл. 4.2 приведены данные, характеризующие фильтрационную способность сапропелей нарушенной структуры. Промораживание резко увеличивает фильтрацию сапропелей.

Таблица 4.2

## Характеристики сапропелей

Озеро	Влажность, %	Зольность, %	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>		Коэффициент водонасыщения	Коэффициент фильтрации, м/сут
			образца	скелета		
Боброви- ческое	685	74,5	1,06	0,135	0,98	0,011 5
Вечер	462	88,3	1,15	0,205	0,95	0,021 3
Погостское	905	74,5	1,05	0,100	0,94	0,008 8
Воронь	568	72,3	1,06	0,160	0,96	0,012 8
Дикое	355	74,1	1,18	–	0,95	0,023 8
Червоное	1 004	37,8	1,05	–	0,96	0,000 4
Сергеев- ское*	842	72,4	1,04	–	0,98	0,038 0
Сергеев- ское**	455	72,4	1,05	–	0,95	0,212 0

\* Сапропель из отстойника.

\*\* Сапропель из отстойника после зимнего промерзания.

Высушенный до некоторого значения влажности сапропель при соприкосновении с водой имеет способность снова впитывать влагу. Наибольшее количество воды, которое может вместить образец сапропеля при длительном намокании, называется водопоглощающей способностью. Количественно водопоглощающая способность характеризуется отношением массы воды, поглощенной образцом сапропеля за время намокания, к начальной массе образца в процентах.

Водопоглощение принято определять за 48 ч нахождения образца в воде [55]. На величину водопоглощения оказывают влияние начальная влажность образца, дисперсность материала, содержание органического вещества в сапропеле. В табл. 4.3 приведены данные, характеризующие водопоглощение сапропелей ненарушенной структуры.



Таблица 4.3

## Характеристики сапропелей

Озеро	Золь- ность	Влажность относи- тельная	Водопоглощаемость, ч			
			%			
			2	6	24	48
Безымянное	51,7	37,3	96,3	141,6	159,3	178,1
Погостское	75,5	11,5	67,8	73,4	74,4	75,5
Воронь	72,3	12,6	51,1	62,4	71,3	74,0
Ореховское	39,4	20,4	70,3	163,8	200,1	219,7
Олтушское	52,6	42,4	57,3	103,9	122,0	345,7
Материнское	–	81,6	482,3	495,0	514,4	617,1
	28,1	10,0	–	54,7	60,5	61,8
Вечер	–	88,8	653,4	668,7	832,5	867,5
	36,2	20,4	–	123,9	128,1	233,9
Любань	–	32,7	254,5	267,3	280,1	281,5
Олтушское	52,6	37,4	176,3	210,6	225,5	273,2
Выгоновское	–	59,7	149,9	158,2	188,8	200,9
Стоячее	–	34,0	107,7	126,4	148,4	227,4
Дикое	–	27,7	50,3	112,6	132,1	157,2
Червоное		36,9	223,8	235,9	239,4	239,4

Согласно данным табл. 4.3 наиболее интенсивно водопоглощение происходит в первые два часа. Сапропели, подвергшиеся механической переработке и высушенные до воздушно-сухого состояния, обладают очень низкой водопоглощательной способностью.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое сапропель?
2. Назовите стадии естественного состояния сапропеля.
3. Чем характеризуется водопроницаемость сапропеля?
4. Что такое гигроскопическая влажность сапропеля?
5. Как определяют водопоглощение сапропеля?
6. Из чего формируется состав органического вещества сапропеля?

## 4.2. Физико-механические свойства

Плотностью твердой фазы  $\rho$  сапропеля называется вес единицы объема беспористого сухого вещества.

Для сапропелей величина плотности в значительной степени зависит от зольности и состава золообразующих веществ. Так, при одинаковой зольности плотности разных по составу сапропелей могут заметно различаться [55]. Карбонатные сапропели, в составе золы которых имеется относительно больше тяжелых минералов (озера Вечер, Сергеевское), имеют большую плотность, чем, например, равные по содержанию золы сапропели озер Луковское, Бобровичское (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Характеристики озерных сапропелей

Озеро	Остаток после прокаливания, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Органические сапропели		
Сергеевское	25,2	1 640
Вечер	28,4	1 650
Ореховское	30,2	1 550
Кремнеземистые сапропели		
Любань	81,6	2 320
Воронь	66,3	2 130
Бобровичское	67,0	2 070
Погостское	63,2	1 920
Карбонатные сапропели		
Вечер	65,1	2 090
Сергеевское	46,5	2 150

Данные анализов показали, что значения плотности для органических сапропелей (зольность до 30 %) составляют 1,5–1,7 г/см<sup>3</sup>, для кремнеземистых (зольность 50–80 %) – 1,7–2,3 г/см<sup>3</sup>, для карбонатных (зольность 45–75 %) – 1,9–2,1 г/см<sup>3</sup>. Плотность сапропелей определялась с помощью пикнометра по методике, применяемой для определения плотности торфа [15].

Под объемной массой  $\gamma$  понимается вес единицы объема материала. Для сапропелей объемная масса – важный показатель при технологических расчетах запасов сырья, определении выхода товарной продукции, производительности технологического оборудования и т. п. Значение объемной массы сапропелей увеличивается при высушивании материала, причем для минерализованных сапропелей эти изменения более заметны, чем для малозольных.

В табл. 4.5. приведены средние значения объемной массы, отвечающие наиболее характерным физическим состояниям вещества сапропеля.

Таблица 4.5

## Средние значения объемной массы сапропеля

Сапропели	Зольность средняя, %	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>		
		при полной влажностности	при относительной влажностности 50 %	при гигроскопической влажностности
Органические	24,1	1,03	1,15	1,25
Кремнеземистые	64,5	1,09	1,35	1,50
Карбонатные	53,3	1,07	1,30	1,45
Смешанные	61,4	1,05	1,25	1,40

Для характеристики физического состояния материала используется также объемная масса скелета  $\delta$ , г/см<sup>3</sup>, которая определяет вес твердой фазы сапропеля в единице объема:

$$\delta = \frac{\gamma}{1 + 0,01W}$$

Гранулометрический состав определяется для выявления количественного соотношения входящих в сапропель фракций, что необходимо для дальнейшей оценки его физических свойств, а также для последующего изучения седиментации, равнопадаемости и классификации сапропелей. Изучение гранулометрического состава сапропелей связано с большими трудностями, что объясняется разнородностью частиц и склонностью их к агрегированию.

Методика выполнения ситовых анализов для всех образцов была одинаковой. С целью дезагрегации исходного материала приготовленная суспензия подвергалась кипячению в течение 0,5 ч с добавкой нескольких капель аммиака. После этого с помощью сит стандартного ряда производилось разделение исходного образца по фракциям. Фракции меньше 20 мк определялись суммарно путем выпаривания и последующего взвешивания. Всего проанализировано 29 образцов сапропелей: 16 органических, 3 карбонатных и 10 кремнеземистых. По всем видам сапропеля получены средние данные по фракциям, а также показаны самые высокие и самые низкие выходы (в процентах по фракциям в пределах данного вида).

В гранулометрическом составе отдельных видов сапропелей имеются некоторые различия (табл. 4.6). Так, органические сапропели отличаются бóльшим содержанием грубодисперсных фракций и большей неоднородностью состава. Более однородный механический состав имеют карбонатные сапропели.

М.П. Воларович и В.П. Тропин [55] при исследовании тонкодисперсной фракции сапропелей получили кривые распределения частиц по размерам для трех наиболее часто встречающихся разновидностей сапропелей, а также установили наличие нескольких максимумов, что свидетельствует о полидисперсности сапропелей и различиях в их составе. Полученные ими данные подтверждаются исследованиями дисперсности сапропелей белорусских озер. Исследования выполнены с помощью седиментометра по методике, разработанной П.В. Чураевым и А.М. Мироновым [58]. Содержание тонкодисперсной фракции в исследованных образцах составляет 10–15 %.

Набухание сапропелей исследовалось в дистиллированной воде (при температуре 25, 40 и 55 °С), а также в щелочных растворах. Определение набухания производилось по методу Васильева [55]. Все измерения были проведены на порошкообразных образцах с размером фракции меньше 0,25 мм и известной начальной влажностью.

Набухаемость характеризовалась увеличением объема исследуемого образца в течение суток и конечной влажностью набухшего сапропеля. В холодной воде (8–10 °С) сухие сапропели практически не набухают, в растворе NaOH (1–5%) набухают, причем более активно в начальной стадии процесса, что связано, очевидно, с изменением состава обменных ионов, усиливающих набухание (замена Ca на Na), и пептизацией материала [67]. На набухание заметно влияет степень дисперсности материала: чем мельче частицы, тем сильнее они набухают. Так, частицы мельче 0,1 мм при прочих равных условиях набухают в два раза больше, чем фракции 1–0,5 мм.

Набухание сапропелей в едкой щелочи 10%-й концентрации протекает более полно [55]. Кинетика набухания для разных видов сапропеля несколько отличается. При этом выявляется определенная тенденция: с повышением содержания в сапропеле легкогидролизуемых веществ повышается и набухание. Набухание сапропелей в 10%-м содовом растворе несколько слабее, чем в 10%-м едком натре.

Температура среды является одним из факторов, влияющих на набухание. Опытами доказано, что с повышением температуры воды наблюдается полное смачивание образца и его набухание. Для всех случаев набухание происходит более интенсивно в первые минуты опыта, а затем процесс замедляется.

Сапропели обладают резко выраженной способностью к усадке при высыхании. Величина усадки (табл. 4.7) при высыхании до гигроскопической влажности составляет 72–95 % от первоначального объема (состояние полной влагоемкости).

Таблица 4.6

## Фракционный состав сапропелей

Вид сапропеля	Суммарный выход, % фракций с размерами, мм												
	>3	3–2	2–1	1–0,5	0,5– 0,25	0,25– 0,20	0,20– 0,175	0,175– 0,150	0,150– 0,100	0,100– 0,076	0,076– 0,050	0,050– 0,020	<0,020
Органический	$\frac{1,24}{1,24}$	$\frac{1,11}{2,35}$	$\frac{5,35}{7,70}$	$\frac{10,44}{18,14}$	$\frac{20,16}{38,30}$	$\frac{12,03}{60,33}$	$\frac{4,08}{54,41}$	$\frac{1,60}{56,01}$	$\frac{4,81}{60,82}$	$\frac{26,73}{87,55}$	$\frac{7,27}{94,82}$	$\frac{2,81}{97,63}$	$\frac{2,37}{100,04}$
Наибольший выход фракций	8,06	4,77	39,53	23,95	45,9	41,59	22,03	3,60	12,7	86,65	8,36	13,17	19,44
Наименьший выход фракций	0,19	0,17	0,85	1,92	3,87	3,03	0,23	0,18	1,02	2,21	0,30	8,53	0,17
Карбонатный	–	$\frac{1,45}{1,45}$	$\frac{9,10}{10,55}$	$\frac{10,80}{21,35}$	$\frac{18,62}{39,97}$	$\frac{15,61}{55,58}$	$\frac{0,57}{56,15}$	$\frac{3,01}{59,16}$	$\frac{9,28}{68,44}$	$\frac{15,75}{84,19}$	$\frac{12,38}{96,57}$	$\frac{1,28}{97,85}$	$\frac{2,15}{100,00}$
Наибольший выход фракций	–	4,35	9,99	14,77	24,59	23,17	0,62	4,51	10,21	39,42	33,99	3,81	6,46
Наименьший выход фракций	–	0	8,54	7,17	12,64	1,45	0,49	1,79	8,45	1,15	3,17	–	–
Кремнезemi- стый	$\frac{0,77}{0,77}$	$\frac{0,48}{1,25}$	$\frac{3,54}{4,79}$	$\frac{8,75}{13,54}$	$\frac{14,38}{27,92}$	$\frac{18,81}{46,73}$	$\frac{2,54}{49,27}$	$\frac{2,40}{51,67}$	$\frac{5,21}{66,88}$	$\frac{34,78}{91,66}$	$\frac{4,20}{95,86}$	$\frac{3,04}{98,90}$	$\frac{1,10}{100,00}$
Наибольший выход фракций	3,04	1,40	10,08	2101 1	35,13	44,17	6,28	5,23	9,17	77,58	33,99	17,21	6,53
Наименьший выход фракций	0,17	0,95	0,08	1,52	5,04	4,02	0,46	0,17	1,07	1,15	2,73	13,16	0,46

Примечание. Числитель – выход по фракциям, %; знаменатель – суммарный выход по фракциям, %.

Таблица 4.7

## Физико-технические характеристики сапропелей

Озеро	Первоначальная влажность, %	Объемная масса первоначальная, г/см <sup>3</sup>		Конечная влажность, %	Объемная масса конечная, г/см <sup>3</sup>		Усадка, %	Коэффициент усадки, $\beta_v$
		образца	скелета		образца	скелета		
Органические сапропели								
Сергеевское	1 026	1,03	0,09	24	1,32	1,19	91,7	0,017
Вечер	1 308	1,01	0,07	9	1,60	1,50	95,2	0,018
Погостское	1 487	1,07	0,14	16	1,27	1,08	93,4	0,012
Олтушское	973	1,04	0,10	25	1,78	1,42	94,0	0,028
Безымянное	1 277	1,03	0,07	13	1,53	1,35	94,4	0,016
Глухое	754	1,03	0,12	30	1,14	0,88	86,2	0,013
Бобровичское	1 370	1,05	0,07	20	1,20	1,01	92,9	0,012
Среднее	1 171	1,04	0,09	19	1,41	1,20	92,5	0,016
Кремнеземистые сапропели								
Бобровичское	669	1,06	0,14	9	1,75	1,72	93,2	0,025
Погостское	657	1,12	0,07	21	1,59	1,47	89,8	0,019
Луковское	583	1,08	0,16	9	1,51	1,38	88,5	0,015
Домжерицкое	359	1,10	0,24	16	1,03	0,88	72,4	0,010
Воронь	858	1,06	0,11	17	1,14	1,42	92,1	0,021
Любань	378	1,17	0,24	11	1,41	1,27	80,7	0,013
Среднее	584	1,10	0,16	14	1,40	1,36	86,1	0,017
Карбонатные сапропели								
Вечер	374	1,19	0,25	8	1,11	1,10	76,4	0,010

Большой усадкой обладают органические сапропели, имеющие большую начальную влажность и меньшую зольность. Усадка образца в состоянии полной влагоемкости может быть выражена зависимостью

$$V_w = V_{\text{сух}} (1 + \beta_v W),$$

где  $V_w$  – объем образца при полной влагоемкости;  $V_{\text{сух}}$  – объем сухого образца;  $\beta_v$  – коэффициент объемной усадки, равный отношению уменьшению объема при изменении влажности на единицу (безразмерная величина).

Величина коэффициента объемной усадки может быть определена по формуле [55]

$$\beta_v = \frac{V_1 - V_2}{V_2 W_1 - V_1 W_2},$$

где  $V_1, V_2, W_1, W_2$  – начальные и конечные значения объема и влажности образца соответственно.

Для каждого образца существует предел влажности, при котором наступает равновесие между силами, стремящимися сблизить частицы в процессе усадки, и силами сопротивления структуры образца. Этот предел влажности  $W_y$  и соответствующий ему коэффициент пористости  $\varepsilon_v$  характеризуют минимальную влажность и плотность, которую приобретает материал в процессе усадки. Значение может быть найдено по формуле

$$W_y = \frac{\varepsilon_y \delta_w}{\gamma} = \left( \frac{1}{\delta_{\text{сух}}} - \frac{1}{\gamma} \right) \delta_w,$$

где  $\delta_w, \delta_{\text{сух}}$  – объемные массы скелета при влажности  $W$  и  $W_y$  соответственно.

Величина  $\beta_v$  является объективной для процесса усадки и характеризует физические свойства и гидрофильность сапропеля. Чем гидрофильнее материал, тем значение  $\beta_v$  меньше.

Так, для глин (монтмориллонитовых и каолиновых) значение  $\beta_v$  изменяется соответственно от 2,9 до 0,2, для торфа  $\beta_v = 0,36$ . Для сапропелей значение коэффициента усадки в зависимости от типа сапропелей (см. табл. 4.7) колеблется от 0,2 до 0,01.

### Контрольные вопросы

1. Что такое плотность твердой фазы сапропеля?
2. Для чего необходима объемная масса сапропеля?
3. Зачем определяется гранулометрический состав сапропеля?
4. Чем характеризуется набухаемость сапропеля?
5. Как температура влияет на набухаемость сапропеля?
6. Что такое усадка сапропеля?
7. Какая величина характеризует физические свойства и гидрофильность сапропеля?

### 4.3. Реологические свойства

Пластичность характеризует способность материала изменять свою форму под влиянием внешних воздействий и сохранять эту форму после прекращения внешнего воздействия.

В табл. 4.8. приведены данные, характеризующие основные виды сапропелей по пределу и числу пластичности.

Таблица 4.8

Реологические свойства сапропелей

Озеро	Предел пластичности		Число пластичности	Показатель консистенции
	верхний	нижний		
<b>Органические сапропели</b>				
Вечер	537	194	343	4,5
Погостское	457	144	313	7,4
Бобровицкое	468	144	324	7,5
Глухое	62!	257	364	2,9
Сергеевское	575	236	339	3,4
Безымянное	513	187	426	2,4
Среднее	528	194	351	4,7
<b>Кремнеземистые сапропели</b>				
Погостское	566	238	328	2,2
Бобровицкое	287	108	179	4,3
Воронь	317	119	198	4,7
Домжерицкое	359	159	200	4,6
Среднее	382	156	226	3,9
<b>Карбонатные сапропели</b>				
Вечер	227	98	129	2,3
Любань	202	74	128	3,0
Ореховское	515	147	318	4,5
Среднее	314	106	191	3,4

Содержание в сапропелях большого количества органического вещества, обуславливающего высокую гидрофильность материала, существенно влияет на величину пластичности. Для органических сапропелей этот показатель равен 320–420. Кремнеземистые и карбонатные сапропели имеют меньшие показатели пластичности (130–320). Для сравнения можно



указать, что, например, пластичность глин, определенная таким же методом, составляет 12–40, и только отдельные виды бентонитовых глин имеют пластичность 140 [55].

Для определения состояния грунтов в естественных условиях пользуются показателем консистенции

$$B = \frac{w - w_p}{w_T - w_p},$$

где  $w$  – естественная влажность, %;  $w_p$ ,  $w_T$  – влажность, отвечающая границам раскатывания и текучести соответственно.

Показатель консистенции для сапропелей в естественном состоянии больше единицы (3,4–4,7). Это означает, что сапропели в естественном состоянии имеют текучую консистенцию.

Под липкостью принято понимать способность сапропеля при определенном содержании воды прилипать к поверхности других материалов. Знание этого показателя необходимо для определения условий работы грунтозаборных органов земснаряда и других машин по добыче и переработке сапропеля, а также при оценке сапропелей как аппликационных материалов.

Определение липкости проводилось на приборе Качинского [15, 55] при предварительном уплотнении образцов в течение 5 мин давлением 0,1–0,3 кГ/см<sup>2</sup>. Для каждого вида сапропеля характерна своя оптимальная влажность, при которой достигается наибольшая липкость (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Максимальные значения липкости сапропелей к металлу

Озеро	Влажность относительная при максимальной липкости, %	Липкость $\tau_{\text{макс}}$ , Г/см <sup>2</sup>
Органические сапропели		
Безымянное	82,3	110
Олтушское	77,8	80
Кремнеземистые сапропели		
Домжерицкое	85,0	47
Воронь	78,1	64
Погостское	88,8	42
Луковское	72,5	73
Карбонатные сапропели		
Вечер, нижний слой	65,1	82
Ореховское	88,7	72

Величина липкости сапропеля зависит от того, к какому материалу он прилипает. Экспериментальным путем установлено, что липкость заметно снижается при контакте сапропелей с другими материалами (табл. 4.10).

Липкость сапропелей в значительной степени зависит от дисперсности материала, его переработки. Чем выше дисперсность, тем выше значение липкости. Так, для переработанных в насосе и гидроциклоне сапропелей озера Червоное значение липкости возрастает до  $35 \text{ Г/см}^2$ , тогда как для сапропелей непереработанных это значение составляет  $23 \text{ Г/см}^2$ .

Таблица 4.10

Значения липкости при контакте сапропелей с другими материалами

Сапропель	Влажность относительная при максимальной липкости, %	Липкость $\tau_{\text{макс}}$ , $\text{Г/см}^2$		
		Пласт-масса	Резина	Дерево
Органический сапропель				
Сергеевское	86,46	16,4	15,6	13,0
Карбонатный сапропель				
Сергеевское	77,82	14,8	9,4	10,0
Кремнеземистый сапропель				
Любань	75,2	12,0	13,9	10,7

Предельное напряжение сдвига – одна из основных реологических характеристик – складывается из сцепления и внутреннего трения материала. Кроме того, предельное напряжение сдвига во многом обусловлено составом сапропеля (минеральным, гранулометрическим), характером структурных связей. Поэтому при действии нагрузки поведение сапропеля определяется сопротивлением сдвигу в зависимости от условий контакта его частиц.

Предельное напряжение сдвига  $\Theta$  устанавливалось с помощью конического пластометра конструкции М.П. Воларовича и С.Н. Маркова [71] с углом раствора конуса  $45^\circ$  при нагрузке  $P = 369 \text{ Г}$ . Исследуемые образцы доводились до состояния полной влагоемкости, при которой и производилось первое измерение. По мере высыхания определялось предельное напряжение сдвига при других влажностях. Структура образцов не нарушалась, образцы не подвергались механической обработке, которая резко изменила бы их реологическую характеристику. Предельное напряжение сдвига падает с увеличением влажности вещества, и это падение наиболее резко выражено до влажности 80–85 % (для органического сапропеля) и 70–75 % (для кремнеземистого и карбонатного), а затем, по мере увеличе-

ния влажности, оно становится более плавным. Кривые зависимости  $\Theta = f(w)$  имеют различный вид и являются более крутыми для органических сапропелей. По мере увеличения пластичности кривые зависимости предельного напряжения сдвига от влажности приобретают более пологий вид.

Предельное напряжение сдвига сапропелей при относительной влажности до 60 % находится в основном в интервале 20–4 000 Г/см<sup>2</sup>. Эти цифры схожи с данными для глин, пластическая прочность которых находится в пределах 50–5 000 Г/см<sup>2</sup> [55].

Промораживание уменьшает величину предельного напряжения сдвига. Например, для органического сапропеля озера Ореховское предельное напряжение сдвига после промораживания в диапазоне влажности 78–85 % снижается на 30–60 %, для кремнеземистого сапропеля озера Бобровицкое – на 30–40 %. Сапропели ненарушенной структуры имеют более высокие пределы прочности, чем сапропели нарушенного сложения. Это подтверждается данными табл. 4.11.

Таблица 4.11

Пределы прочности сапропелей при различной его консистенции

Консистенция сапропеля (физическое состояние)	Влажность, %	Предел прочности, кГ/см <sup>2</sup>	
		Сапропели ненарушенного сложения	Сапропели нарушенного сложения
Твердая	45	0,34–0,45	0,11–0,15
Полутвердая	60–185	0,30–0,23	0,11–0,09
Тугопластичная	200–290	0,23–0,21	0,09–0,08
Мягкопластичная	300–430	0,20–0,17	0,08–0,07
Текучепластичная	450–560	0,16–0,14	0,08–0,07
Текучая	600–900	0,12–0,07	0,06–0,04

При высыхании прочность сапропелей сильно возрастает. В табл. 4.12 приведены средние значения прочности кубиков сформованного сапропеля на сжатие.

Сопротивление сдвигу зависит от степени водонасыщения и состава сапропелей. Величина сопротивления сдвигу характеризуется коэффициентом (углом) трения  $\phi$  и сцеплением  $C$ .

В табл. 4.13 приведены значения  $\phi$  и  $C$  для сапропелей при вертикальной нагрузке 0,2–1,0 кГ/см<sup>2</sup>. Опыты проводились по методу прямого плоскостного среза с помощью прибора П10-С. Стабилизация влаж-

ности и пористости образцов под заданной нагрузкой осуществлялась с помощью прибора ГПП-29.

С уменьшением влажности сцепление и угол внутреннего трения увеличиваются. При одинаковой влажности органические сапропели характеризуются наибольшим сцеплением и углом трения.

Таблица 4.12

Средние значения прочности на сжатие кубиков сформованного сапропеля

Озеро	Зольность, %	Влажность относительная, %		Предел прочности на сжатие, кГ/см <sup>2</sup>	Количество определений
		при формовании	при раздавливании		
Органические сапропели					
Торфомассив «Дукора»	11,4	88,6	10,9	150,0	18
Б. Святое	33,6	94,5	9,3	429,0	6
Святое	22,4	87,3	13,0	322,2	5
Кремнеземистые сапропели					
Любань	54,8	85,5	11,0	140,0	15
Червоное	44,5	88,5	11,0	210,0	15
Карбонатные сапропели					
Торфомассив «Калпеница»		81,0	8,9	148,6	15
Вечер	67,8	71,1	13,0	65,0	15

Таблица 4.13

Значения коэффициента трения и сцепления  $\phi$  и  $C$

Сапропель	Влажность относительная, %	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	Сцепление, кГ/см <sup>2</sup>	tg $\phi$
Органический	81–84	1,07–1,04	0,205–0,115	0,11–0,060
Кремнеземистый	64–69	1,24–1,22	0,175–1,230	0,250–0,073
Карбонатный	64–71	1,26–1,20	0,283–0,107	0,135–0,098

Вязкость – это способность материала оказывать сопротивление относительному смещению его слоев. Для определения вязкости применялся вискозиметр ротационного типа РВ-8 [15, 55], с помощью которого можно

изучать деформационные, реологические и структурно-механические свойства вязко-пластичных материалов. Вязкость вычислялась по формуле

$$\eta = K \frac{P - P_0}{n},$$

где  $P$  – груз, вращающий цилиндр вискозиметра, Г;  $P_0$  – собственное трение подшипников, которое соответствует в данном случае 1 г;  $n$  – скорость вращения цилиндра, об/с;  $K$  – константа, которая для данного прибора равна 0,393 мм.

Все определения производились при температуре 15 °С. Так как для получения реологической характеристики того или иного вида сапропеля недостаточно определить вязкость при одном только физическом состоянии, необходимо получить значения вязкости при различных влажностях сапропеля, поэтому для каждого сапропеля анализы производились при нескольких влажностях.

Выполненные исследования позволили построить кривые зависимости вязкости от влажности сапропелей. Наиболее резко эта зависимость выражена для органических сапропелей. Так, при относительной влажности 92 % вязкость органического сапропеля равна 80 пз (пуазель), карбонатные сапропели при этой же влажности имеют вязкость только 2–4, а кремнеземистые – не больше 36 пз.

С увеличением содержания сухого вещества вязкость резко возрастает. Для сапропелей значение вязкости может достигать  $10^4$  пз [55].

Характерной особенностью сапропелей является уменьшение вязкости при увеличении скорости сдвига (табл. 4.14). Вязкость сапропелей, так же как и жидкостей, уменьшается с повышением температуры. Увеличение температуры от 12 до 20 °С приводит к уменьшению вязкости для органических сапропелей в 1,3 и для кремнеземистых в 1,1 раза.

Таблица 4.14

Вязкость сапропелей

Кремнеземистый сапропель				Органический сапропель, $w = 94,4 \%$		Карбонатный сапропель, $w = 90,4 \%$	
$w = 93,8 \%$		$w = 92,2 \%$		Скорость сдвига, м/с	$\eta$ , пз	скорость сдвига, м/с	$\eta$ , пз
скорость сдвига, м/с	$\eta$ , пз	скорость сдвига, м/с	$\eta$ , пз				
0,09	68,0	0,28	46,8	0,06	96,6	0,03	101,8
0,52	14,5	1,02	26,0	0,11	64,5	0,21	41,7
1,08	9,5	1,67	18,3	0,39	26,6	0,40	14,6

### Контрольные вопросы

1. Перечислите реологические характеристики сапропеля.
2. Зачем необходим показатель консистенции?
3. Что такое пластичность? У каких видов сапропелей пластичность больше?
4. Что такое предельное напряжение сдвига?
5. Что такое вязкость сапропеля?
6. Что оказывает влияние на вязкость сапропеля?

### 4.4. Естественная радиоактивность

При использовании сапропелей в медицине (курортология, бальнеология), в сельскохозяйственной практике (удобрения) и некоторых других областях представляет интерес изучение их радиоактивности.

Данные для естественной радиоактивности различных видов сапропелей в воздушно-сухом состоянии приведены в табл. 4.15. Исследования выполнены с помощью счетчика СБТ-10 и пересчетного устройства ПП-16.

Радиоактивность измерялась непосредственно в импульсах в минуту по формуле

$$I = \frac{I_0 - I_{\Phi}}{t},$$

где  $I_0$  – среднее значение импульсов от исследуемого образца;  $I_{\Phi}$  – среднее значение импульсов от фона (до и после счета импульсов от сапропеля);  $t$  – продолжительность счета импульсов. В опытах время счета для образцов и фона принималось равным 30 мин. Контроль счета двойной.

Согласно данным табл. 4.15 наибольшей активностью обладают кремнеземистые сапропели. Это объясняется наличием в зольной части названных сапропелей сравнительно большого количества калия (озера Червоное – 0,12–0,61 % и Любань – 0,17 % на сухое вещество), естественный изотоп которого калий-40 обладает значительной энергией  $\beta$ -излучения ( $E = 1,235$  мгэв). К тому же в зольной части кремнеземистых сапропелей более вероятно присутствие и других тяжелых радиоактивных элементов.

Радиоактивность карбонатных сапропелей (озера Вечер и Сергеевское – придонные слои) сравнительно невысока (0–5 имп./мин). Практически на уровне фона радиоактивность органического погребенного сапропеля оз. Глухое. Активность сапропелей изменяется в зависимости от глубины залегания. Слой залежи на глубине 3–4 м обладает повышенной активностью, а у нижележащих слоев активность близка к нулю.

Таблица 4.15

Данные для естественной радиоактивности различных видов сапропелей  
в воздушно-сухом состоянии

Озеро	β-активность	
	Имп./мин	Экв. % U
Органические сапропели		
Сергеевское	5,7	$2,05 \cdot 10^{-4}$
Глухое	0	
Карбонатные сапропели		
Сергеевское	0	
Вечер	5,3	$1,88 \cdot 10^{-4}$
Кремнеземистые сапропели		
Любань	11,7	$4,15 \cdot 10^{-4}$
Червоное	31,5	$1,12 \cdot 10^{-3}$
Кошо	14,7	$5,72 \cdot 10^{-4}$
Кагальное, глубина залегания, м:		
1,0	44,8	$1,59 \cdot 10^{-3}$
2,5	28,8	$1,02 \cdot 10^{-4}$

Примечание. По данным М.П. Воларовича и др. [75] β-активность тонкодетритового сапропеля составляет на глубине залегания 1,5 м – 3 имп./мин; 3,0 м – 3,3–4,0 имп./мин; 3,5 м – 3,8–8,0 имп./мин; 4,0 м – 4,2–1,0 имп./мин; 4,5 м – 4,8–2,0 имп./мин; 5,5 м – 5,8–0 (отсутствует); 6,0 м – 6,3–0 (отсутствует).

### Контрольные вопросы

1. Зачем необходимо знание радиоактивности сапропеля?
2. Как определить радиоактивность сапропелей?
3. В зависимости от каких факторов изменяется активность сапропелей?
4. Почему у кремнеземистых сапропелей наибольшая радиоактивность?
5. Как изменяется радиоактивность у различных сапропелей?

### 4.5. Основные физические свойства сапропелевой пульпы

Водосапропелевая смесь (пульпа) образуется в результате всасывающего воздействия грунтового насоса в процессе гидромеханизированной экскавации сапропелей и последующего механического воздействия при гидротранспорте ее по трубам к месту сгущения. Она представляет собой гетерогенную суспензию, состоящую из воды и полидисперсных органических и минеральных частиц.

Сапропелевая пульпа содержит в своем составе большое количество органических коллоидных частиц и по своим реологическим свойствам относится к системам, обладающим аномалией вязкости.

Пульпа характеризуется значениями консистенции, объемной массой, вязкостью, скоростью осаждения, механическим составом твердых частиц.

Консистенция сапропелевой пульпы выражается концентрацией абсолютно сухого вещества в единице объема воды (г/л).

В табл. 4.16 приведены данные, характеризующие зависимость объемной массы пульпы от содержания сухого вещества для различных типов сапропелей. В диапазоне рабочей консистенции (25–80 г/л) объемная масса пульпы равна 1,005–1,050 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 4.16

Значения объемной массы пульпы сапропеля

Содержание сухого вещества в пульпе, г/л	Объемная масса пульпы сапропеля, г/см <sup>3</sup>		
	органического, $A_s = 25 \%$	карбонатного, $A_s = 56 \%$	кремнеземистого, $A_s = 60 \%$
12	1,002	1,003	1,003
18	1,003	1,003	–
25	1,005	–	1,011
32	1,007	–	1,012
40	1,008	1,011	1,015
50	1,014	1,030	1,019
80	–	1,045	1,050

Скорость осаждения является прямым расчетным показателем при определении режимов гидротранспорта, расчетов отстойников, при намыве на поля кольматации и т. п. В табл. 4.17 приведены данные наблюдений за скоростью осаждения твердой фазы пульпы в стеклянных цилиндрах. Пульпа перед опытом была переработана насосом. Осаждение измерялось в течение суток.

Согласно данным табл. 4.17 частицы органических сапропелей осаждаются медленно, причем образуется очень рыхлый осадок. Частицы кремнеземистых и карбонатных сапропелей оседают намного быстрее, образуется более плотный осадок ( $w = 90–94 \%$ ).

Вязкость определялась с помощью ротационного вискозиметра РВ-8 при температуре пульпы 12 °С. В табл. 4.18 приведены зависимости вязкости от содержания сухого вещества в пульпе (скорость сдвига 0,4 м/с).

Согласно данным табл. 4.18 наиболее заметно вязкость изменяется в зависимости от содержания сухого вещества для органических сапропелей (2–54 пз). Пределы изменения вязкости пульпы кремнеземистых и карбонатных сапропелей в диапазоне изменения влажности 97–94 % невелики (1,5–8 и 2–5 пз).



Таблица 4.17

## Данные осаждения различных сапропелей

Сапропель	Содержание сухого вещества, г/л		Оседание, % к первоначальному объему, за время, ч							
	в пульпе	в осадке	0,25	0,5	1,0	2	3	5	6	24
Органический, $A_s = 25\%$	22	30	1,0	1,2	1,4	2,3	3,3	5,5	6,7	24,0
Кремнеземистый										
$A_s = 40\%$	23	35	1,2	1,6	2,3	3,7	5,1	8,9	10,7	31,0
$A_s = 70\%$	36	57	1,2	1,6	3,0	5,1	7,6	12,4	14,6	36,5
Карбонатный										
$A_s = 55\%$	17	97	1,2	1,8	2,6	4,7	6,7	11,0	12,7	32,1
$A_s = 65\%$	38	47	1,3	1,9	3,0	5,7	8,9	15,1	17,1	41,7

Таблица 4.18

## Характеристики сапропелей

Озеро	Содержание сухого вещества в пульпе, г/л	Вязкость $\eta$ , пз	Предельное напряжение сдвига, Г/см <sup>2</sup>
Органические сапропели			
Сергеевское	40,0	1,6	0,033
	39,8	2,6	0,092
	60,1	18,0	0,952
Судобль	18,0	1,2	0
	23,0	1,9	0
	32,0	6,0	0,016
	46,0	30,0	1,781
	57,0	54,0	4,179
Кремнеземистые сапропели			
Вечер	25,0	1,4	0,033
	45,0	2,1	0,083
	65,0	8,0	0,501
Погостское	33,0	2,3	0,026
	51,0	2,5	0,034
	76,0	3,0	0,047
Карбонатные сапропели			
Сергеевское	18,0	2,2	0,008
	33,0	2,4	0,017
	54,0	2,6	0,050
	75,0	4,5	0,200
Вечер	38,0	1,2	0,017
	65,0	1,4	0,029

Гидравлическая крупность частиц – один из основных показателей, определяющий характер транспортирования и осаждения частиц в потоке. Количественно гидравлическая крупность равна скорости осаждения частиц в стоячей воде, м/с, и зависит от размера, формы, плотности частиц, а также от температуры среды. Сапропелевые частицы обычно имеют разнообразную форму. Плотность в естественном состоянии их также неодинакова. В связи с этим действительная скорость осаждения частиц будет отличаться [55].

На основании выполненных исследований на установке по определению скорости свободного падения сапропелевых частиц получена формула зависимости скорости свободного падения от размера частиц в диапазоне 20–200 мк:

$$\lg V = a \lg r_{\text{эф}} + b,$$

где  $a$  и  $b$  – расчетные коэффициенты, их значения для карбонатных сапропелей приведены в табл. 4.19.

Найдем эффективный радиус частиц  $r_{\text{эф}}$ :

$$r_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{s}{\pi}};$$

где  $s$  – площадь проекции частицы.

Таблица 4.19

Значения расчетных коэффициентов

Температура среды, °С	Расчетные коэффициенты		Предел применимости по $r_{\text{эф}}$ , мК
	$a$	$b$	
15	1,408 5	0,112 7	10–100
20	1,044 0	0,987 6	20–100
25	1,162 9	1,017 9	20–90

Скорость падения частиц размером больше 200 мкм определяется в стеклянном цилиндре. Для частиц размером 200–1 000 мкм эта скорость определяется по усредненной скорости оседания небольшого количества частиц узкого класса крупности. Скорости падения частиц больше 1 мм измеряются отдельно для каждой частицы с последующим измерением размеров частиц с помощью измерительного микроскопа и определением показателя формы частиц.

В табл. 4.20 приведены средние значения размера частиц и скорости падения (при  $t = 15$  °С), полученные в результате статистической обработки большого числа измерений для каждого класса крупности.

Таблица 4.20

Средние значения размера частиц и скорости падения (при  $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Размер частиц, мк	Показатели формы	Скорости при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , см/с	Размер частиц, мк	Показатели формы	Скорости при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , см/с
225	1,0	0,476	960	1,0	1,531
240	1,0	0,383	990	1,0	1,786
260	1,0	0,410	1 020	1,0	2,083
270	1,0	0,442	1 590	0,81	2,500
420	1,0	0,595	1 650	0,85	3,333
480	1,0	0,666	1 760	0,80	3,333
500	1,0	0,852	1 950	0,97	4,000
520	1,0	0,852	2 000	0,68	2,410
690	1,0	1,363	2 180	0,73	4,082
750	1,0	1,389	2 360	0,73	3,262
780	1,0	1,402	2 690	0,61	2,941
880	1,0	1,744	–	–	–

Осредненная гидравлическая крупность, по которой обычно ведется расчет транспортирующей способности потока, определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{\sum \bar{\omega}_i q_i}{100},$$

где  $\omega_i$  – гидравлическая крупность отдельных фракций;  $q_i$  – процентное содержание по весу отдельных фракций.

### Контрольные вопросы

1. Как образуется и что представляет собой пульпа сапропеля?
2. Какими показателями характеризуется пульпа сапропеля?
3. Каким прибором можно определить вязкость сапропеля?
4. Что такое гидравлическая крупность частиц?
5. Для чего используется гидравлическая крупность?
6. Как изменяется скорость падения частиц в зависимости от их крупности?
7. Перечислите основные физические свойства сапропелевой пульпы.

## 5. ХИМИЧЕСКИЙ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ САПРОПЕЛЕЙ

Сапропели из разных месторождений отличаются по составу золообразующих компонентов и составу органической части. Значительное различие в составе наблюдается и в отложениях, отобранных с разной глубины одного месторождения. Нижние слои чаще более минерализованы.

### 5.1. Зольность

Под зольностью сапропелей понимается суммарное процентное содержание несгораемой минеральной части (остаток после прокаливания при температуре 900–1 000 °С до полного разрушения карбонатов) и карбонатного углекислого газа. В зависимости от содержания зольных элементов сапропели можно разделить на три группы: малозольные ( $A_s$  до 30 %), средnezольные ( $A_s = 30–50$  %), высокозольные ( $A_s = 50–85$  %).

Малозольные сапропели представляют интерес для использования в лечебных целях, как сырья для химической и микробиологической промышленности. Средnezольные и высокозольные сапропели (кремнеземистые, смешанные) наиболее рационально использовать в сельском хозяйстве для удобрений, карбонатные сапропели – в качестве материала для известкования почв, приготовления минеральных и минерально-витаминных добавок в комбикорма животным.

Величина зольности и состав золообразующих компонентов зависят от условий формирования и накопления сапропелей в водоеме и определяются многими факторами: условиями питания и химическим составом питающих водоемов, привносом минеральных веществ в результате водной и ветровой эрозии, антропогенным фактором и др.

Предел колебания величины зольного остатка, в частности верхний предел, – величина условная (85 %). На основании имеющихся данных нижний предел зольности сапропелей составляет 4–7 %. До сих пор отсутствуют специальные исследования механизма формирования зольности сапропелей.

При оценке сапропелей с позиции их практического использования, переработки, выделения или концентрации отдельных компонентов важным представляется определение форм связи зольных элементов с органическим веществом сапропеля.

В зависимости от формы связи зольных элементов с органикой их можно разделить на три группы.

1. Зольные компоненты, отделяемые физическими методами (механические включения минералов, аутигенные и терригенные минеральные примеси). Эта группа характеризует обогатимость сапропеля.

2. Зольные компоненты, переходящие в раствор при кислотной или щелочной обработке сапропеля (компоненты, адсорбционно связанные с органическим веществом, а также присутствующие в поровом растворе в ионной форме). Зольные элементы этой группы характеризуют сапропель в отношении его применимости для тех или других целей. Например, содержание подвижных форм В, Сu, Са, Р важно с точки зрения агрохимических свойств сапропеля.

3. Прочно связанные зольные компоненты: глинистые минералы (образующие органоглинистые соединения), компоненты комплексных металлорганических соединений (с гуминовыми кислотами или соединениями типа витамина В<sub>12</sub>, в состав которого входит кобальт).

Согласно данным табл. 5.1, по мере увеличения зольности соответственно возрастает содержание минеральных примесей, которые представлены как минералами хемо- и биогенного происхождения, так и механическими примесями, внесенными извне.

Таблица 5.1

Содержание минеральных примесей в сапропелях

Озеро и тип сапропеля	Зольность с учетом СО, %	Содержание минеральных примесей, %	
		на сухое вещество	к общей зольности
Любань, кремнеземистый	67,6	27,0	40,0
Вечер, кремнеземистый	44,6	20,0	44,8
Червоное, кремнеземистый	44,9	16,3	36,3
Вечер, карбонатный	88,5	12,1	13,7
Святое, органический	28,3	3,0	10,6

Содержание минеральных примесей в сапропелях колеблется в широких пределах и в известной мере отражает те условия, при которых происходило накопление донных отложений. Наибольшее содержание минеральных примесей отмечается в отложениях озер проточного типа и подверженных абразии берегов. По данным А.Я. Рубинштейна [79] минеральные примеси в высокозольных сапропелях составляют до 70 % по отношению к общей зольности.

При определении минералогического состава исследовались фракции более 0,25, 0,25–0,05 и 0,05–0,01 мм. Средневзвешенное содержание основных минералов в сапропелях (фракция 0,25–0,05 мм) приведено в табл. 5.2.

Различие по минеральному составу между сапропелями кремнеземистого и карбонатного типов заключается в том, что основным минералом в осадках кремнеземистого типа является кварц. Он представлен угловаты-

ми, остроугольными и окатанными, нередко корродированными с поверхности, покрытыми лимонитурированной пленкой, грязно-белыми, прозрачными и полупрозрачными зернами. Содержание кварца доходит до 75,5 %, а в отдельных фракциях (в основном более 0,25 мм) – до 95 % легкой фракции. При переходе от крупных к более мелким фракциям процентное содержание кварца неизменно уменьшается. В подчиненном количестве в легкой фракции присутствуют полевые шпаты, количество которых достигает своего максимума во фракции 0,05–0,01 мм. Наряду с названными минералами значительная роль принадлежит глинисто-железисто-карбонатным агрегатам с кремнистым цементом опалового типа (14,5–73,8 %). Эти показатели подтверждаются данными других исследований о том, что валовое содержание кремнезема определяется не только кварцем (кристаллическим кремнеземом), но и кремнеземом, находящимся в других формах (аморфной, в органоминеральных комплексах, коллоидах) [80, 81]. Накопление глинисто-железисто-карбонатных агрегатов связано с мелкоалевритовой размерностью зерен.

Таблица 5.2

Механический состав минеральных примесей

Озеро и тип сапропеля	Размер фракций, мм		
	> 0,25	0,25–0,05	< 0,05
Любань, кремнеземистый	10,49	87,86	1,65
Червоное, кремнеземистый, глубина 1 м	12,87	84,14	2,99
Червоное, кремнеземистый, глубина 3 м	26,13	66,15	6,72
Вечер, карбонатный	4,38	84,11	11,52

В карбонатных сапропелях (озеро Вечер) легкая фракция представлена преимущественно карбонатами (кальцит и доломит до 49,6 %), фосфатами железа (32,4 %), глинисто-железисто-карбонатными агрегатами (11,8 %). Только 5,3 % составляет кварц.

Состав тяжелой минеральной фракции изученных сапропелей кремнеземистого типа в качественном отношении близок. Преобладающими терригенными минералами являются магнетит, амфиболы и гранаты. Средневзвешенное содержание магнитных минералов (магнетит, часто с пленкой бурых окислов железа) составляет 57,4 % от веса тяжелой фракции. Причем с уменьшением размерности зерен содержание их считается от 75,4 % во фракции >0,25 мм, до 25,2 % во фракции 0,05–0,01 мм. Далее идут ильменит, циркон, рутил, лейкоксен. Необходимо отметить

присутствие в небольших количествах метаморфических минералов (дис-тена, силлиманита, ставролита, андалузита) во всех образцах.

Ассоциация терригенных минералов в основных чертах сходна с ассоциацией этих минералов из четвертичных отложений берегов озер, но отличается меньшим разнообразием и пониженным содержанием отдельных минералов. Это объясняется тем, что кластические минералы в сапропелях – результат переотложения окружающих пород. Из аутигенных минералов доминируют бурые окислы железа (4,1–67,4 % тяжелой фракции), являющиеся в большинстве продуктом изменения и преобразования железистых минералов (магнетит, магнетит и др.). Фосфаты представлены в основном в карбонатных сапропелях (18,9 %).

Содержание магнитных минералов в карбонатных сапропелях также довольно высоко (средневзвешенное содержание 48,5 % тяжелой фракции). Аутигенные минералы – магнетит и ильменит – являются основными в процентном отношении минералами тяжелой фракции карбонатных сапропелей. Другие минералы представлены в незначительном количестве. Иногда встречается пирит. Отмечено низкое содержание пирита, спорадически встречаемого в озерных отложениях Полесья [82].

Минералогический состав показывает, что наряду с обломочным аллотигенным материалом в образовании отложений принимают участие продукты биологического и химического осаждения. Минералогическим следствием протекающих биохимических процессов является накопление кальцита, спорадически встречаемого пирита, генетически связанного с химическими преобразованиями органического вещества.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение зольности.
2. На какие группы делят сапропель по зольности?
3. Почему в сапропеле содержится зольный остаток?
4. Назовите три группы зольных компонентов сапропеля.
5. Как изменяется зольность у разных сапропелей?
6. Почему сапропели различного типа отличаются по минеральному составу?

## **5.2. Химический состав минеральной части**

Химический состав минеральной части сапропелей представлен содержанием оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ .

В табл. 5.3 приведены обобщенные данные, характеризующие средний валовой состав золы основных типов сапропелей. Минеральные элементы рассчитаны на сухое вещество сапропеля с учетом органики и  $\text{CO}_2$ .

Таблица 5.3

## Химический состав минеральной части сапропелей

CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	$\frac{SiO_2}{CaO}$
<u>0,48–3,43</u> 3,10	<u>0,12–1,19</u> 0,41	<u>0,38–1,92</u> 1,49	<u>0,06–1,12</u> 0,35	<u>0,09–0,30</u> 0,28	2,21	4,33
<u>16,84–39,88</u> 25,93	<u>0,25–1,18</u> 0,77	<u>0,69–1,87</u> 1,32	<u>0,39–0,49</u> 0,44	<u>0,09–0,36</u> 0,21	22,16	0,41
<u>1,13–7,33</u> 5,31	<u>0,12–2,21</u> 1,15	<u>0,96–2,87</u> 1,74	<u>0,12–1,75</u> 0,69	<u>0,03–0,20</u> 0,18	4,41	8,37
<u>27,8–16,0</u> 21,78	<u>0,72–2,49</u> 1,02	<u>2,33–1,18</u> 1,46	<u>0,58–0,15</u> 0,29	<u>0,0–0,85</u> 0,25	18,16	1,15

Для кремнеземистых сапропелей характерно высокое содержание SiO<sub>2</sub> и полуторных окислов. Отношение SiO<sub>2</sub> : CaO составляет 8,57. Карбонатные сапропели отличаются высоким содержанием CaO, достигающим в отдельных месторождениях 40 % на сухое вещество, и малым содержанием SiO<sub>2</sub>. Отношение SiO<sub>2</sub>:CaO для этого типа сапропелей составляет 0,41. Сапропели смешанного типа или переходные (по аналогии с торфяной залежью переходного типа) характеризуются примерно равным содержанием CaO в золе. Наибольшим постоянством состава зольной части по глубине отличаются кремнеземистые сапропели. Для отложений сапропелей карбонатного типа характерно увеличение CaO с увеличением глубины и соответственно уменьшение SiO<sub>2</sub>). Органические сапропели имеют тенденцию к увеличению соединений серы с глубиной. В ряде случаев зольность в верхнем горизонте залежи увеличивается (главным образом за счет SiO<sub>2</sub>). Это объясняется повышенным влиянием эрозионных процессов, в частности ветровой эрозии.

От сапропелей открытых водоемов болотные сапропели отличаются большей плотностью. В естественном состоянии они свободно режутся ножом, сохраняя при этом придаваемую им форму. При подсыхании они заметно расслаиваются, образуя тонкие, характерно изогнутые слои. Так же как и сапропели открытых водоемов, болотные сапропели подразделяются на органические, кремнеземистые, карбонатные и смешанные.

В табл. 5.4 приведен состав основных золообразующих компонентов некоторых болотных сапропелей. Большинство исследованных болотных сапропелей – органического и карбонатного типов. Зольность органических сапропелей, как видно из табл. 5.4, находится в пределах 10–17 %. Карбонатные сапропели имеют высокую зольность, главным образом за счет содержания CaCO<sub>3</sub>. Сумма карбонатов CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> в отдельных отложениях сапропелей карбонатного типа достигает 80 %. Для многих болотных сапропелей характерно повышенное содержание SO<sub>3</sub> в золе, что указывает на присутствие сульфатов в отложениях.



Таблица 5.4

## Состав основных золообразующих компонентов болотных сапропелей

Месторождение	Зольность с учетом CO <sub>2</sub> , %	Содержание, %						
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Органические сапропели								
Игналинский Мох*	10,59	65,89	9,68	7,84	8,48	–	5,08	0,77
Альховик*	15,92	22,50	3,89	18,72	25,37	1,5	27,48	0,85
Красный Мох*	18,27	62,40	9,54	7,90	13,69	3,05	2,47	1,33
Святое*	17,03	63,79	2,45	5,75	14,90	1,82	3,63	–
Дукора	11,2	6,1	1,3	2,1	0,8	0,1	0,7	–
Дягили	17,41	68,85	3,80	5,64	11,26	1,56	10,08	0,96
Заборовский Мох*	11,91	48,61	7,11	11,19	15,78	1,43	13,94	0,63
Туринское**	5,83	10,40	–	8,20	18,55	–	–	0,22
Добеевский Мох	8,53	38,79	–	7,90	30,40	–	–	0,82
Карбонатные сапропели								
Калпеница	79,51	1,86	2,20	3,53	80,99	3,38	1,55	1,20
Столовици**	51,54	24,58	–	14,00	53,10	4,06	–	0,04
Журавлевское**	52,94	12,84	–	3,20	72,97	3,05	–	0,02
Кремнеземистые сапропели								
Щербинский Мох	59,92	79,72	6,23	4,50	3,55	1,61	4,45	0,50
Светлый Мох	49,60	68,03	–	12,00	7,00	0,50	–	0,18

\* По данным В.С. Позняк [55].

\*\* По данным А.В. Тишковича и др. (1972) [55].

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы входят в состав золы?
2. Что характерно для кремнеземистых сапропелей?
3. Какие сапропели содержат больше оксидов кальция?
4. В каких сапропелях уменьшается количество кремнезема?
5. Как зависит зольность от вида сапропеля?

### 5.3. Элементарный состав

Элементарный состав органической массы сапропелей сравнительно постоянен. Содержание углерода колеблется от 52 до 56 %, водорода от 6 до 7,5, азота от 3,5 до 6,0 % на органическую массу (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Элементарный состав кремнеземистых и карбонатных сапропелей

Сапропель	Состав на органическую массу					С/Н
	С	Н	N	S	O	
Кремнеземистый	<u>56,1–47,6</u>	<u>6,5–8,1</u>	<u>3,4–5,9</u>	<u>0,7–5,6</u>	<u>29,7–39,9</u>	7,2
	52,4	7,2	4,3	1,4	34,6	
Карбонатный	<u>39,1–48,6</u>	<u>6,3–8,9</u>	<u>3,2–5,9</u>	<u>0,7–6,3</u>	<u>23,6–39,4</u>	7,0
	53,1	7,6	4,6	2,5	32,2	

Примечание. В числителе – пределы колебания; в знаменателе – среднее значение.

По сравнению с торфами [1, 55] сапропели характеризуются повышенным содержанием водорода и несколько меньшим содержанием углерода. Для торфов соотношение С/Н = 9–12, для сапропелей – 7–8.

Согласно данным табл. 5.5 содержание серы в сапропелях колеблется от 0,7 до 6,3% на органическое вещество. Сера в сапропелях находится в виде сульфатной, сульфидной, элементарной и органической. Карбонатные сапропели содержат больше серы, чем кремнеземистые, что в известной мере согласуется с условиями их образования. В отдельных месторождениях сапропеля отмечается высокое содержание органической серы (до 5 % на сухое вещество [55]).

По сравнению с торфами сапропели содержат больше азота (табл. 5.6). Пелагенный слой сапропелевых отложений содержит до 7,0–7,5 % азота на органическую массу. С.И. Кузнецов [92] объясняет этот факт, во-первых, тем, что в пелоген поступает материал с высоким содержанием белковых веществ, в которых содержание азота может достигать 19 %. Во-вторых, в верхнем пелагеном слое может накапливаться значительное количество микробного белка в результате интенсивно протекающих здесь микробиологических процессов.

Показателем микробиологической деятельности может служить количественное содержание бактерий. По данным С.И. Кузнецова, среднее количество бактерий в 1 г сырого ила в верхнем 15-сантиметровом слое сапропеля для разных озер колеблется от 845 до 2 415 млн. На глубине более 1 м количество бактерий в 1 г сырого вещества снижается до 100–200 млн.

Таблица 5.6

Характеристика сапропелей

Озеро	Зольность с учетом CO <sub>2</sub> , %	Азот общий, %	
		на сухое вещество	на органическую массу
Червоное	45,5	2,15	3,80
Судобль	13,0	4,25	4,81
Ореховское	39,6	2,50	3,57
Выгода	26,6	3,06	4,17
Стоячее	15,4	4,23	4,99
Луковское	61,7	2,81	5,57
Сведь	60,1	1,48	3,71
Лесное	21,5	3,64	4,63
Дикое	60,2	1,25	2,89
Кузьмичское	17,2	3,60	4,35
Сергеевское	40,0	3,36	4,49
Домжерицкое	27,9	3,48	4,68
Вечер	36,2	2,74	3,82

Азотистые вещества сапропеля представляют собой сложные высокомолекулярные соединения [55].

Для выяснения прочности связи азотсодержащих соединений с органическим веществом Ф.А. Пуитусом выполнен гидролиз отдельных образцов сапропелей 2- и 20%-ми растворами соляной кислоты. Характеристика образцов сапропеля приведена в табл. 5.7.

Результаты исследований гидролиза 2%-м раствором HCl представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.7

## Характеристика образцов сапропеля

Озеро	Глубина отбора проб, см	Зольность, %	Азот общий на органическую массу, %
Таткуль	10	36,28	6,20
Шарташ	0–10	–	6,21
Карасье	0–12	56,30	7,50
Червоное	0–50	42,12	5,40
Луковское	0–50	61,70	5,57

Таблица 5.8

## Результаты исследований гидролиза 2%-м раствором HCl

Сапропель	Зольность с учетом CO <sub>2</sub> , %	Содержание азота на сухое вещество, %		Содержание азота на органическое вещество, %
		Общий азот	Аммиачный азот	
Кремнеземистый	66,3	1,82	0,014	5,42
Органический	32,5	3,35	0,015	4,96
Карбонатный	73,0	1,26	0,007	4,66

Гидролиз 2 %-м раствором HCl (табл. 5.9) переводит в растворимое состояние 14,8–27 % органического вещества и 18–31,3 % азота (аминного азота 10–15 %). При гидролизе 10%-м раствором HCl в гидролизате обнаруживается от 37 до 58 % органического вещества и 16–75 % азота (аминного азота 46–55 %).

Таким образом, гидролиз слабой минеральной кислотой переводит в растворимое состояние органического азота до 31 %. При гидролизе 20%-м раствором HCl представляется возможным перевод в растворимое состояние до 75 % азота в сапропелях.

Значительная часть органического вещества гидролизатов представлена аминокислотами, качественная характеристика которых показала, что при 2%-м гидролизе в раствор переходит фракция, представленная следующими аминокислотами: пролин, фенилаланин, валин, лейцин, аргенин, лизин, аланин, глютаминовая кислота.

Таблица 5.9

Результаты исследований гидролиза сапропелей, %

Сапропель	Гидролизуется органического вещества		Гидролизуется азота			
			2%-й HCl		20%-й HCl	
	2%-й HCl	20%-й HCl	общего	аминного	общего	аминного
Кремнеземистый	27,00	58,28	31,32	15,25	75,50	55,39
Органический	14,85	37,25	21,41	12,43	70,80	49,40
Карбонатный	22,70	47,40	18,27	10,14	66,70	46,13

При более жестком гидролизе (20%-я HCl) в гидролизате обнаруживается значительно большее количество аминокислот. Обнаружены аминокислоты: лейцин, фенилаланин, валин + метионин + триптофан, тирозин, пролин, аланин, аргинин, гистидин, лизин, цистеин, треонин, глицин, серин, аспаргиновая и глютаминовая кислоты.

#### Контрольные вопросы

1. Чем характеризует элементарный состав сапропелей?
2. Как колеблется содержание серы в сапропелях?
3. Что представляют собой азотистые вещества сапропеля?
4. Чем проводят гидролиз сапропелей?
5. Зачем проводится гидролиз сапропелей?

#### 5.4. Групповой состав

Групповой состав сапропелей различных месторождений неодинаков. Согласно исследованиям В.Е. Раковского [55, 59] сапропели по результатам группового (компонентного) состава можно разделить на две группы. Первая группа объединяет сапропели с низким содержанием легкогидролизуемых веществ и повышенным содержанием гуминовых кислот. Для второй (более многочисленной) группы характерно высокое содержание легкогидролизуемых веществ и пониженное содержание гуминовых кислот.

Примером, характеризующим различие в групповом составе, могут служить сапропели Нарочанской и Браславской группы озер (табл. 5.10). Общее содержание органического вещества определено по потере при прокаливании (900–1 000 °С) за вычетом CO<sub>2</sub>.

Содержание битумов, то есть веществ, извлекаемых смесью спирта и бензола (воска, смолы и некоторых других веществ), в сапропелях сравнительно невысоко (3–11 % на органическую массу или 1,3–5 % на сухое вещество).

Таблица 5.10

## Групповой состав сапропелей

Озеро	Содержание, % на органическое вещество					
	Битума	Легкогидро- лизуемых	Гуминовых кислот	Фульвокислот	Трудногидро- лизуемых	Негидролизу- емого остатка
Нарочанская группа						
Вишневокское	5,15	33,35	18,31	7,05	11,81	10,71
Б. Швакшта	5,03	38,16	14,50	9,65	7,35	17,17
Дягили	4,31	52,10	10,20	12,50	6,50	11,40
Браславская группа						
Подресте	4,17	19,30	25,15	6,13	8,52	27,55
Ожехово		15,09	22,22	22,62	–	26,23

Большой интерес в научном и практическом отношении представляют гуминовые кислоты сапропелей – вещества, извлекаемые из сапропелей раствором едкого натра.

По внешним признакам (цвет, хрупкость) гуминовые кислоты сапропелей не отличаются от гуминовых кислот торфов, почв. По химическому составу гуминовые кислоты сапропелей заметно отличаются от гуминовых кислот торфов (табл. 5.11) [55].

Таблица 5.11

## Сравнительная характеристика гуминовых кислот сапропелей и торфа

Гуминовые кислоты	Элементарный состав, % на горючую массу								
	С	Н	N	O + S (по разно- сти)	Выход смолы при тер- мическом разложе- нии, %	Содер- жание в смо- ле фе- нолов, %	Функциональные группы гуминовых кислот, мг-экв/г		
							Мета- кисиль- ные	Кар- бо- кисиль- ные	Феноль- ные
Сапропелей	50– 59	6,2– 6,9	5,2– 7,1	28–38	16,8–20,1	9–11	0,5–0,8	1,8– 2,7	1,3–3,2
Торфа	53– 58	4,2– 5,7	0,6– 2,2	35–39	11,5–13,0	25–26	0,2–1,5	1,8– 3,5	3–7

Гуминовые кислоты сапропелей рассматриваются как самостоятельные природные соединения.

Для гуминовых кислот сапропелей по сравнению с гуминовыми кислотами торфов характерно более высокое содержание азота и водорода, что указывает на особенности формирования этих элементов на основе материала, богатого белковыми и жировыми веществами.

В результате термолиза гуминовых кислот сапропелей выход смолы получается выше, чем из гуминовых кислот торфов. В смоле гуминовых кислот сапропелей содержание фенолов намного меньше, чем в аналогичных продуктах торфов.

Негидролизуемый остаток сапропелей отличается от негидролизуемого остатка торфов более высоким содержанием водорода (7,91–8,60 %) и высокой зольностью (35,9–62,3 %). Выход его достаточно высок и достигает 30 %.

При оценке сапропелей для сельскохозяйственного использования большое значение имеет содержание в них легкогидролизуемых веществ, которые путем гидролиза 2%-м раствором соляной кислоты можно превратить в простые пентозные и гексозные сахара, доступные для усвоения организмами животных или являющиеся питательным субстратом для микробного синтеза. Содержание легкогидролизуемых веществ в сапропелях колеблется от 8 до 52 %. Значительные количества азотсодержащих веществ в составе легкогидролизуемых соединений представляют интерес при использовании сапропелей в животноводстве и медицине.

Емкость поглощения является непосредственным критерием реакционной способности вещества сапропелей. В табл. 5.12 приведены данные по емкости поглощения сапропелей различных генетических типов. Определение емкости производилось при гигроскопической влажности образцов.

Согласно данным табл. 5.12, емкость поглощения обуславливается главным образом содержанием органического вещества.

Исследования О.Е. Фатчихиной [55] показывают, что емкость поглощения органических сапропелей может достигать более высоких значений (до 134 мг-экв). При этом 60–80 % приходится на долю поглощенного кальция и 15–20 % – на долю магния.

Таблица 5.12

Емкость поглощения сапропелей

Озеро	Влажность относительная, %	Емкость поглощения, мг-экв/100 г
Органические сапропели		
Сергеевское	10,4	65,11
Выгоновское	5,4	33,12
Карбонатные сапропели		
Сергеевское	5,1	21,78
Вечер	5,4	37,28
Кремнеземистые сапропели		
Любань	4,9	43,95
Сведь	7,7	20,27

## Контрольные вопросы

1. Как разделяются сапропели по групповому составу?
2. Что входит в групповой состав сапропелей?
3. Чем отличаются гуминовые кислоты сапропелей от торфа?
4. Чем отличается групповой состав сапропелей от торфа?
5. Какие виды сапропелей имеют большую емкость поглощения?
6. Чем является емкость поглощения для сапропеля?

## 5.5. Микроэлементы

Изучение содержания микроэлементов в сапропелях представляет интерес как для непосредственного использования этих отложений (удобрения, кормовые средства, лечебные грязи и вытяжки), так и для познания генезиса осадочных пород, выяснения геохимических особенностей отдельных районов и т. п.

Согласно данным табл. 5.13, содержание важнейших микроэлементов в сапропелях колеблется в широких пределах. Отмечается повышенная концентрация таких микроэлементов, как кобальт, никель, медь, бор, цинк.

Наиболее богаты микроэлементами кремнеземистые сапропели. Карбонатные сапропели в расчете на сухое вещество содержат меньшее количество микроэлементов. На основании выполненных анализов подчеркнута неоднородность распределения отдельных микроэлементов по глубине отложений (табл. 5.13, 5.14).

Представленные данные позволяют отметить повышенное содержание кобальта и никеля в верхних слоях отложений.

Представляет практический интерес содержание йода в сапропелях. Наибольшее количество йода характерно для кремнеземистых сапропелей (до 8,74 мг/кг воздушно-сухого образца). В карбонатных сапропелях содержится до 2,16 мг/кг йода. В общем в сапропелях содержание йода обнаружено в пределах 0,3–4,95 мг/кг, брома – до 6 58 мг/кг сухого вещества.

В сапропелях содержатся значительные количества каротиноидов, витаминов и других биологически активных веществ. Каротиноиды сапропелей в основном состоят из  $\beta$ -каротина (провитамина А). Количество  $\beta$ -каротина в карбонатных сапропелях Урала достигает 30 мг/кг, а в кремнеземистых – около 20 мг на 1 кг сухого вещества. Содержание каротина в отдельных месторождениях сапропеля достигает 178 мг/кг сухого вещества.



Таблица 5.13

Содержание в сапропелях ряда микроэлементов, мг/кг сухого вещества

Озеро	Количество анализов	Co	Ni	Pb	Cu	B	Zn	Mo	V	Cr	Ge
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
Органические сапропели											
Густота	1	0,9	17,0	22,0	13,0	48,0	114,0	2,8	22,0	46,0	–
Межутол	2	2,0	8,0	2,0	5,5	107,0	117,0	4,0	5,0	8,5	0,1
Манец	1	1,0	-	8,0	5,5	4,0	39,0	–	–	–	–
Ольшица	1	3,0	0,6	4,0	6,0	35,0	81,0	5,5	–	8,0	–
Красновское	2	2,5	3,0	4,0	8,5	13,5	19,5	0,3	10,0	18,0	–
Плавно	1	4,0	1,0	5,0	2,5	8,0	12,0	–	–	–	–
Теплиц	2	14,0	2,3	16,8	2,3	50,0	27,5	4,4	–	7,0	–
Олтушское	8	4,7	25,0	12,9	26,5	101,0	184,0	3,1	19,0	37,0	1,3
Ореховское	8	23,3	12,8	8,6	3,4	69,5	187,0	1,3	31,9	32,1	0,5
Вечер	4	11,3	38,2	23,0	14,4	87,6	410,0	4,6	7,8	35,0	До 1,5
Безымянное	18	1,3	10,7	13,0	11,0	53,0	192,0	1,7	2,3	19,0	0,7
Сведь	3	20,0	1,8	15,4	2,2	45,0	400,0	1,5	7,9	5,0	1,3
Сергеевское	1	7,1	12,0	–	18,0	–	–	8,3	23,0	17,0	–
Среднее		7,1	11,0	11,2	19,1	51,8	148,5	3,4	14,3	21,1	До 1,5
Кремнеземистые сапропели											
Черное	3	7,2	17,0	16,0	13,3	37,0	–	1,9	3,9	72,0	0,2
Густота	2	20,0	17,5	19,0	9,5	28,0	–	2,3	25,0	73,0	–
Миорское	1	12,0	52,0	24,0	37,0	81,0	58,0	4,5	206,0	190,0	–
Щолко	1	7,5	13,0	–	14,0	55,0	71,0	2,0	35,0	57,0	–
Долгое	2	10,0	13,0	49,0	16,0	39,5	–	–	16,5	82,0	–
Плиса	3	7,5	13,0	13,0	20,0	52,6	39,0	–	51,3	94,0	–
Медзолот	2	6,3	12,5	7,5	26,0	60,0	154,0	3,3	12,0	45,0	–
Дривято	3	8,1	12,6	9,3	18,3	127,0	20,0	3,5	20,0	42,0	–
Погост	1										

Продолжение табл. 5.13

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
Паулье	3	7,6	17,0	13,0	22,6	167,0	22,0	4,0	47,0	38,6	–
Черная Уроба	3	8,5	16,3	17,0	23,3	144,0	–	3,1	44,7	48,0	–
Лепельское	3	6,0	10,0	15,0	16,0	178,0	–	2,3	17,0	29,0	–
Луковское	23	16,4	38,0	12,2	13,5	106,0	268,0	3,1	16,2	45,0	11,3
Любань	8	10,9	10,2	3,1	19,0	70,0	210,0	–	6,4	6,9	–
Выгоновское	8	8,0	13,0	14,0	8,0	48,0	131,0	–	25,0	23,0	–
Глубокое	5	5,0	12,0	3,1	17,0	56,0	79,0	0,7	32,0	125,0	–
Сведь	2	7,0	36,5	10,2	14,7	84,0	114,0	–	27,0	31,0	3,2
Погостское	2	4,5	32,0	6,0	4,0	50,0	–	–	–	8,5	2,0
Воронь	1	10,1	17,3	17,2	27,0	129,0	290,0	–	71,0	110,0	–
Червоное	32	4,2	8,5	2,8	9,3	41,7	57,6	0,2	22,5	36,9	–
Среднее		8,5	18,6	13,7	17,1	79,8	111,8	2,5	37,6	58,6	–
Карбонатные сапропели											
Висяты	1	8,5	5,1	34,0	12,0	–	–	–	–	46,0	–
Катилово	1	10,0	24,0	63,0	20,0	25,0	132,0	1,8	36,0	75,0	–
Долгое	1	8,0	5,0	16,0	12,0	11,0	–	–	–	37,0	–
Манец	2	7,5	15,0	14,5	20,5	23,0	40,0	2,0	41,0	127,0	–
Ольшица	1	14,0	33,0	15,0	45,0	63,0	–	12,0	–	153,0	–
Плавно	1	10,0	2,5	8,0	13,0	15,0	–	–	–	–	–
Струсто	2	5,2	6,3	5,3	5,0	21,5	–	–	–	5,5	–
Теплиц	2	4,5	–	24,5	2,5	10,7	37,5	–	–	3,5	–
Ореховское	6	5,2	8,7	3,6	4,8	64,0	115,0	1,1	19,3	29,6	0,3
Вечер	9	–	10,6	7,9	8,7	44,5	110,0	1,0	–	5,8	–
Свирь	2	5,8	9,8	4,8	10,3	73,0	169,0	–	42,0	27,0	–
Вишневское	4	1,7	3,8	4,3	10,4	28,5	174,5	–	18,5	16,8	–
Среднее		7,3	11,5	16,7	13,7	34,4	111,1			47,8	

Таблица 5.14

Содержание некоторых микроэлементов в сапропелях,  
мг/кг сухого вещества

Озеро	Глубина отбора пробы, %	Зольность, %	Co	Ni	Zn	Cu	
Органические сапропели							
Безымянное	0,2	42	32,0	27,0	250	13,0	
	0,3	45	32,0	13,3	101	12,0	
	0,5	42	29,0	5,9	86	14,0	
	1,0	40	5,6	10,4	90	10,0	
	1,5	38	5,7	8,4	76	10,6	
	2,0	22	24,0	2,7	220	8,2	
	2,5	29	24,0	21,0	200	8,9	
Ореховское	3,0	27	2,6	4,9	151	22,0	
	0,7	32	5,6	4,0	154	4,3	
	1,2	25	4,0	7,0	138	3,5	
	1,7	26	5,7	23,0	340	2,6	
	2,3	26	2,9	8,8	170	3,6	
	2,7	27	3,9	23,0	305	4,6	
Кремнеземистые сапропели	3,2	30	5,1	31,0	240	3,3	
	Любань	0	60	12,5	19,1	258	24,0
		0,5	59	21,0	9,5	135	22,0
		1,0	73	8,0	3,6	160	21,0
		1,5	87	15,0	10,4	418	30,0
		2,0	87	7,8	4,3	283	10,0
		2,5	45	11,7	17,5	156	9,0
		3,0	57	6,8	5,1	93	14,0
3,2		65	4,5	12,0	77	19,0	
Погостское	1,2	54	8,1	11,0	53	13,0	
	4,0	33	4,0	5,3	120	11,0	
	6,5	22	2,2	4,4	660	11,0	
Червоное	0,5	59	7,2	20,0	77	10,7	
	1,5	59	7,8	30,0	124	19,0	
	2,0	57	5,2	15,0	66	11,0	
	2,3	35	2,8	3,8	26	2,6	
Карбонатные сапропели							
Вечер	1,5	47	2,8	5,2	450	8,5	
	2,0	73	–	2,6	–	6,6	
	2,6	73	–	–	–	5,1	
	3,0	80	–	–	–	–	

В сапропеле найдены в большом количестве витамины Е (до 33 мг/%), С, D и Р. Имеются также витамины группы В, в том числе тиамин (В1), рибофлавин (В2), пантотеновая кислота (В3), пиродоксин (В6), фолиевая кислота (В9), кобаламин (В12). Большую ценность представляет содержащийся в сапропелях витамин В12 (табл. 5.15 [55]), обладающий, как известно, способностью стимулировать биосинтез метионина непосредственно в организме. Экспериментальные исследования [55] показывают, что витамин В12 синтезирует многие микроорганизмы иловых отложений. Он играет важную роль в процессе кроветворения, активизирует белковый обмен. Присутствие витамина В12 в сапропелях повышает их ценность как кормовых добавок.

Таблица 5.15

Содержание витамина В12  
в отдельных месторождениях сапропелей

Озеро	Глубина отбора, м	Влажность, %	Содержание В12, мкг/кг	
			на сырую массу	на сухое вещество
Сергеевское	2	94,1	70	119
	2	93,4	50	75
	3	88,3	50	42
	4	75,2	20	80
		56,5*	110*	250*
		48,4**	80**	155**
		0,7***	35***	35***
Лесное	1	—	125	1 106
	2	—	8	88
Б. Святое	1,4–2,0	—	—	2 100
	3–4	—	—	781
М. Святое	2–3	—	—	400
Судобль	2–3	—	—	48

\*Проба отобрана из отстойников через месяц после намыва.

\*\* То же, после зимнего промораживания.

\*\*\* То же после 2-летнего хранения в сухом виде.

Отмечается более высокая концентрация витамина В12 в верхнем слое сапропеля (до 1 м). При промораживании и длительном хранении содержание витамина В12 значительно снижается. Интересно отметить, что витамин В12 обнаружен также и в отжимных водах сапропелей. Так, в отжимной воде из сапропелей озера Сергеевского среднее содержание витамина В12 (из трех проб) составило 0,32 мкг/л.

В сапропелях Латвии содержится до 25 мг/кг рибофлавина на сырое вещество [55]. Содержание фолиевой кислоты в сапропелях колеблется в пределах 42–64 мкг/кг сухого вещества.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие микроэлементы находятся в сапропелях?
2. Какие витамины содержатся в сапропелях?
3. Как изменяется содержание микроэлементов сапропелях?
4. Как изменяется содержание витаминов в сапропелях?

## **5.6. Микробиологический состав и биологическая активность**

Обилие органических и минеральных соединений, достаточная влажность, благоприятные температура и реакция среды обеспечивают условия для развития в сапропелях различных видов микроорганизмов. Озерные отложения сапропелей обильно заселены микроорганизмами. Общее число микроорганизмов в 1 г сырого сапропеля, взятого из верхнего слоя, достигает 1–2 млрд [55]. С переходом в более глубокие слои, начиная примерно с глубины 0,6–1,0 м от поверхности, количество микроорганизмов снижается.

Состав микрофлоры сапропелей разнообразен. В результате микробиологического анализа в сапропелях обнаружены микроорганизмы маслянокислого брожения, олигонитрофильные, денитрофицирующие, возбудители брожения клетчатки, сульфатредуцирующие бактерии, а также бактерии, разрушающие белковые вещества, и др.

В верхних слоях сапропелевых отложений отмечается наличие актиномицетов – организмов, способных помимо белков и углеводов разрушать весьма стойкие органические вещества (жиры, воска, смолы, гуминовые вещества и т. д.).

Сапропель, внесенный в почву, повышает количество полезных для плодородия микроорганизмов, участвующих в процессах мобилизации азотного запаса в почве (группа аммонификаторов, тарификаторов, азотфиксаторов) и в разрушении клетчатки.

В сапропелях найдены микроорганизмы [55], выделяющие антибиотики, которые обладают антагонизмом в отношении ряда патогенных сапрофитных микроорганизмов, что имеет важное значение при использовании этих сапропелей в бальнеологии.

Из сапропелей выделены бактерии, способные вырабатывать белок из природного газа (Нагиб, 1972). Все это свидетельствует о важности изучения микробиологических свойств озерных отложений.

Биологическая активность сапропелей определяется активностью каталазы, пероксилазы, редуктазы, протеазы и слабее липазы. Наиболее активны поверхностные горизонты сапропелей.

Исследованиями установлено [55], что активность каталазы почти во всех пробах была значительной (до 11,6–15,0 см<sup>3</sup> О<sub>2</sub> за 2 мин). Наибольшей активностью каталазы обладают кремнеземистые сапропели. Высокая активность каталазы обнаружена в сапропелях озера Червоного (табл. 5.16). Наибольшая активность каталазы характерна для верхнего 2,5-метрового слоя. Сапропели, хранящиеся в отстойниках, имеют повышенную активность каталазы по сравнению с сапропелями в озере.

Таблица 5.16

Характеристика биологической активности сапропелей

Скважины	Глубина отбора пробы, м	Влажность, %	Зольность, %	Каталаза, см <sup>3</sup> О <sub>2</sub> на 1 г сухого сапропеля за время, мин				
				1	2	3	4	5
7	1,0–1,5	95,38	41,05	12,1	19,0	23,1	27,4	30,1
	2,0–2,5	93,32	44,05	12,3	15,5	18,0	20,5	22,3
	3,5–4,0	88,10	34,74	5,6	6,5	7,5	7,7	8,7
14	0,5–1,0	91,07	49,59	12,9	17,7	21,6	24,0	27,2
	1,0–1,5	94,01	42,03	14,4	21,4	27,0	30,3	33,8
	2,0–2,5	93,39	40,50	14,8	21,2	25,9	29,1	32,7
	3,0–3,4	88,54	53,94	5,2	8,9	11,4	12,4	13,4
Сапропель, взятый из отстойника после зимнего хранения		85,6	42,28	24,8	36,8	46,9	53,6	59,3

Результаты микробиологических анализов отдельных месторождений сапропелей приведены в табл. 5.17.

Таблица 5.17

## Содержание микроорганизмов в сапропелях

Озеро	Глубина отбора, м	Количество микроорганизмов на 1 г сухого вещества сапропеля, тыс.						
		Аммонифицирующие бактерии	Спрообразующие бактерии	Микроорганизмы, усваивающие минеральные формы азота		Грибы	Маслянокислые бактерии	Олигонитрофилы
				бактерии	актиномицеты			
Червоное, скв. 7	1–1,5	17 532	13,0	16 234	130	0	54,1	24 242
	2–2,5	135 329	4,5	39 970	+	0	74,9	164 521
	3,5–4	23 455	2,5	62 997	+	0	212,0	82 303
Червоное, скв. 14	0,5–1	90 146	+	13 102	896	0	78,4	272 228
	2–2,5	27 231	21,2	3 933	+	0,5	106,0	75 643
	3–3,4	22 339	17,5	1 623	+	0	610,8	37 347
Судобль	1,5–1,75	26 389	16,0	3 153	100	0,6	Не определялись	
	3,5–3,75	22 785	23,0	1 094	227	9,8		
	9,0–9,85	10 559	27,0	8 661	593	2,9		
	15,95–16,2	18 446	26,0	2 721	302	5,2		
Святое, скв. 2	0,75–1	82 685	23,0	3 334	156	17,4	Не определялись	
	2–2,5	18 757	32,0	2 603	136	19,3		
	2,5–2,75	22 166	23,0	4 182	430	9,4		
	4–4,25	63 079	15,0	5 229	260	9,5		
М. Святое	0,15–0,555	3 810	0	287	0	39,0	Не определялись	
	0,8–1	1 498	0	217	0	27,0		
	1,3–1,6	2 362	0	182	0	15,0		
	2,6–2,8	4 050	0	162	0	9,4		

### **Контрольные вопросы**

1. Какие факторы обеспечивают хорошие условия развития микроорганизмов в сапропелях?
2. Какие микроорганизмы обнаружены в сапропелях?
3. Зачем сапрпель вносится в почву?

В результате статистических и корреляционных исследований установлены группы признаков состава и свойств торфа, определяющие его качественные показатели как сырья для комплексной переработки. Обобщены результаты исследований отечественных научных школ, приведены подробные данные о групповом химическом составе торфа, и определены критерии его пригодности для различных направлений термобioхимической переработки.

Исследование и разработка химико-технологических процессов в торфяном производстве предусматривает получение новых продуктов и материалов. Практической направленностью отличаются исследования по получению из торфа воска и других сопутствующих продуктов. На основе глубокого анализа имеющихся данных представлены условия извлечения из торфа битумов, их состав, свойства и структура; приведена технология получения воска из торфа, на базе которой построен завод торфяного воска. Раскрыта сущность новых схем получения модифицированных восков.

Таким образом, приведенные в учебном пособии обобщения рассматриваются как основа прогрессивных технологий добычи, переработки и использования торфа в народном хозяйстве с учетом природоохранных функций торфяных месторождений.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

Элементный состав торфа (минимальное – максимальное значение)

Тип, группа, вид торфа	Количество образцов	Элементный состав, % от органической массы				
		C	H	N	S	O
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<b>Тип низинный</b>	<b>908</b>	<b>52,7-63,8</b>	<b>4,7-7,0</b>	<b>0,5-4,0</b>	<b>0,02-6,65</b>	<b>24,73-39,52</b>
Группа древесная	252	53,5-63,8	4,9-6,8	1,0-3,8	0,02-6,54	24,73-38,57
Древесный	96	54,2-63,8	4,9-6,7	1,4-3,7	0,14-6,54	25,47-38,57
Ольховый	60	54,3-61,2	5,0-6,5	2,1-3,8	0,14-5,21	25,27-36,67
Березовый	29	55,7-60,4	5,1-6,2	1,8-3,5	0,19-2,62	30,61-36,22
Еловый	23	56,3-61,8	5,1-6,8	1,7-3,8	0,02-2,60	28,26-35,29
Сосновый	43	53,5-63,2	5,0-6,4	1,0-3,4	0,14-5,05	24,73-38,56
Ивовый	1	–	–	–	–	–
Группа древесно-травяная	160	54,5-62,9	5,0-7,0	1,6-3,9	0,09-6,65	26,75-37,86
Древесно-осоковый	67	55,6-62,9	5,0-6,7	1,6-3,5	0,15-6,65	26,75-36,26
Древесно-тростниковый	58	54,5-61,8	5,1-7,0	1,6-3,9	0,09-3,10	29,06-37,86
Группа древесно-моховая	20	54,5-61,3	5,3-6,2	1,4-3,4	0,24-2,99	29,80-37,53
Древесно-гипновый	8	56,2-59,9	5,5-6,2	2,1-3,4	0,24-0,74	31,08-35,06
Древесно-сфагновый	12	54,5-61,3	5,3-6,0	1,4-2,8	0,24-2,99	29,80-37,53
Группа травяная	281	53,1-62,9	4,7-6,7	0,5-4,0	0,08-3,91	28,10-38,67
Хвощовый	4	56,9-61,7	5,3-5,7	2,7-3,3	0,37-1,64	28,84-34,31
Тростниковый	53	53,9-62,9	4,9-6,7	1,7-3,7	0,08-3,91	28,10-37,76
Вахтовый	16	56,7-60,1	5,5-6,5	2,0-3,5	0,13-2,12	30,94-34,53
Осоковый	171	54,2-61,4	4,7-6,7	0,5-3,8	0,12-2,62	29,56-36,81
Шейхцериевый	31	53,1-61,8	5,6-6,7	1,4-4,0	0,12-0,71	29,28-38,67
Группа травяно-моховая	94	53,7-60,7	5,2-6,5	1,2-3,5	0,12-1,91	31,30-38,35
Осоково-гипновый	51	53,7-60,7	5,2-6,5	1,4-3,5	0,13-1,91	31,59-38,35
Осоково-сфагновый	31	55,5-60,2	5,5-6,2	1,2-3,3	0,12-1,06	31,30-36,21
Группа моховая	101	52,7-61,8	5,1-6,7	1,1-3,6	0,14-4,0	28,43-39,52
Гипновый	60	52,8-61,8	5,2-6,7	1,3-3,6	0,14-2,95	28,43-39,32
Сфагновый	40	52,7-60,0	5,1-6,5	1,1-2,9	0,14-4,0	30,37-39,52
<b>Тип переходный</b>	<b>321</b>	<b>49,9–65,1</b>	<b>4,8–7,0</b>	<b>0,9–3,4</b>	<b>0,12–4,26</b>	<b>26,22–43,28</b>
Группа древесная	34	55,8-63,3	4,8-6,7	1,2-3,4	0,12-4,02	27,87-36,78
Древесный	34	55,8-63,3	4,8-6,7	1,2-3,4	0,12-4,02	27,87-36,78
Группа древесно-травяная	29	57,2-65,1	5,6-6,4	1,0-2,7	0,13-0,36	26,83-34,79
Древесно-осоковый	18	57,6-65,1	5,6-6,3	1,6-2,7	0,13-0,36	26,83-34,09

Продолжение прил. 1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Группа древесно-моховая	26	56,5-63,6	5,5-6,9	1,4-3,1	0,13-4,26	26,96-35,22
Древесно-сфагновый	26	56,5-63,6	5,5-6,9	1,4-3,1	0,13-4,26	26,96-35,22
Группа травяная	141	49,9-63,2	5,3-7,0	1,0-3,4	0,12-2,89	28,24-43,28
Шейхцериевый	74	49,9-63,2	5,5-6,9	1,0-3,3	0,12-0,58	28,24-43,28
Осоковый	63	55,1-63,1	5,3-7,0	1,6-3,4	0,13-2,89	28,71-37,08
Группа травяно-моховая	51	52,3-62,4	5,5-6,6	1,2-3,3	0,12-1,06	27,77-40,57
Осоково-сфагновый	38	52,3-62,4	5,5-6,6	1,2-3,3	0,12-1,06	27,77-40,57
Группа моховая	40	51,8-61,9	5,2-6,3	0,9-3,1	0,13-3,07	26,22-40,73
Гипновый	4	56,4-61,9	5,4-5,9	1,2-3,0	0,17-3,07	26,22-35,51
Сфагновый	36	51,8-59,3	5,2-6,3	0,9-3,1	0,13-1,14	30,79-40,73
<b>Тип верховой</b>	<b>785</b>	<b>48,0-64,8</b>	<b>5,1-7,3</b>	<b>0,6-3,6</b>	<b>0,06-2,52</b>	<b>26,42-45,17</b>
Группа древесная	27	57,7-64,2	5,4-6,7	0,9-2,4	0,08-2,52	26,66-34,65
Сосновый	27	57,7-64,2	5,4-6,7	0,9-2,4	0,08-2,52	26,66-34,65
Группа древесно-травяная	59	54,1-64,4	5,7-7,3	1,0-3,1	0,08-1,21	26,42-38,60
Сосново-пушицевый	59	54,1-64,4	5,7-7,3	1,0-3,1	0,08-1,21	26,42-38,60
Группа древесно-моховая	25	54,9-64,8	5,2-6,7	0,8-2,8	0,09-2,13	26,77-37,86
Сосново-сфагновый	25	54,9-64,8	5,2-6,7	0,8-2,8	0,09-2,13	26,77-37,86
Группа травяная	83	53,0-63,3	5,6-6,9	1,0-3,6	0,10-2,40	28,07-38,63
Пушицевый	41	54,9-63,0	5,6-6,9	1,0-2,7	0,10-2,40	28,07-36,95
Шейхцериевый	42	53,0-63,3	5,8-6,5	1,1-3,6	0,11-0,43	29,01-38,63
Группа травяно-моховая	121	48,5-63,8	5,4-6,9	0,6-3,1	0,07-0,50	27,96-43,31
Пушицево-сфагновый	75	50,2-62,2	5,4-6,6	0,6-2,4	0,07-0,30	30,17-43,02
Шейхцериево-сфагновый	46	48,5-63,8	5,4-6,9	1,2-3,1	0,09-0,50	27,96-43,31
Группа моховая	470	48,0-61,3	5,1-6,8	0,6-2,8	0,06-1,11	30,23-45,17
Фускум-торф	102	48,0-59,7	5,1-6,4	0,7-2,7	0,06-0,72	33,49-45,17
Медиум-торф	184	48,6-61,0	5,4-6,7	0,7-2,8	0,08-0,80	30,23-44,27
Комплексный	138	49,5-60,4	5,3-6,6	0,6-2,6	0,06-0,64	32,23-43,76
Сфагново-мочажинный	46	50,3-61,3	5,2-6,8	0,6-2,5	0,10-1,11	30,92-42,73

## Групповой состав органической массы торфа

Тип, группа, вид торфа	Количество образцов	Групповой состав органической массы, %						
		Б	ВР и ЛГ	В том числе РВ	ГК	ФК	Ц	Л
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<b>Тип низинный</b>	<b>361</b>	<b>1,2-12,5</b>	<b>9,2-45,8</b>	<b>4,3-26,9</b>	<b>18,6-55,5</b>	<b>5,0-27,9</b>	<b>0,0-9,0</b>	<b>3,3-26,2</b>
<i>Группа древесная</i>	74	1,4-12,5	9,2-31,7	4,4-15,0	27,9-51,5	8,5-27,2	0,0-5,3	6,6-26,2
Древесный	28	1,4-8,9	15,2-28,1	5,3-15,0	27,9-51,5	10,3-24,1	0,4-5,3	6,6-26,2
Ольховый	17	2,0-4,9	13,9-31,7	5,8-10,9	37,1-49,4	8,5-22,5	0-2,4	6,6-17,4
Березовый	14	1,8-5,2	16,5-30,1	6,2-12,4	33,8-46,7	15,8-25,0	0,6-2,5	6,9-29,6
Еловый	3	1,7-9,4	24,0-26,5	10,1-13,8	32,8-46,5	9,1-26,1	0,4-1,4	10,8-17,0
Сосновый	12	1,8-12,5	9,2-31,0	4,4-11,8	32,6-47,6	12,5-27,2	0,7-3,0	9,8-22,0
Ивовый	1	–	–	–	–	–	–	–
<i>Группа древесно-травяная</i>	71	1,5-10,7	9,3-34,3	6,6-21,3	29,1-55,5	9,2-27,9	0,4-3,8	6,9-20,0
Древесно-осоковый	44	1,5-10,1	9,3-34,3	7,2-21,3	30,6-55,5	9,2-22,5	0,4-3,3	6,9-18,0
Древесно-тростниковый	15	2,9-10,7	16,8-31,2	6,6-14,6	29,1-46,5	12,0-27,9	0,4-3,8	8,3-20,0
<i>Группа древесно-моховая</i>	4	3,1-3,6	23,3-27,8	11,1-16,6	33,3-45,7	13,4-20,3	0,7-3,6	10,6-14,6
Древесно-гипновый	2	3,1-3,3	23,3-25,2	11,1-16,3	33,3-45,7	13,4-20,3	0,7-3,6	12,5-14,6
Древесно-сфагновый	2	3,1-3,6	23,4-27,8	12,0-16,6	35,2-43,0	13,7-19,2	1,3-3,4	10,6-14,5
<i>Группа травяная</i>	126	1,5-12,1	11,0-45,0	4,3-26,6	25,5-53,6	5,0-25,4	0,5-5,8	5,1-24,0
Хвощовый	3	2,4-4,2	18,3-28,7	6,9-12,7	29,5-45,7	16,6-20,3	1,8-3,0	9,0-14,7
Тростниковый	22	1,5-9,3	11,1-45,0	4,3-23,3	25,5-53,3	5,0-23,4	0,5-4,2	5,7-21,8
Вахтовый	3	4,1-11,0	11,0-25,6	7,9-13,1	33,5-46,9	13,0-17,0	0,4-2,6	11,0-20,7
Осоковый	83	1,8-11,0	11,7-40,8	7,0-26,6	30,3-53,6	7,6-25,4	0,4-5,7	5,1-24,0
Шейхцериевый	16	2,9-12,1	14,7-35,7	7,4-25,3	25,9-49,4	10,3-17,0	1,1-5,8	9,6-19,0
<i>Группа травяно-моховая</i>	47	2,1-6,2	16,1-40,7	7,6-24,3	3,8-16,2	28,0-43,9	10,1-22,2	1,3-7,8
Осоково-гипновый	31	2,1-6,2	16,1-40,7	7,6-24,3	30,9-43,9	10,1-22,2	1,3-7,8	3,8-13,8

## Продолжение прил. 2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Осоково-сфагновый	14	2,8-6,1	22,0-35,8	14,3-24,2	28,0-42,5	10,3-19,6	2,1-7,0	5,5-16,2
<i>Группа моховая</i>	39	1,2-8,9	18,2-45,8	8,7-26,9	18,6-49,4	9,6-26,8	0,5-9,0	3,3-18,4
Гипновый	22	2,1-7,2	19,4-43,3	10,4-26,9	24,4-49,4	9,6-22,7	0,5-7,7	3,3-12,8
Сфагновый	17	1,2-8,9	18,2-45,8	8,7-25,7	18,6-42,8	10,6-26,8	1,0-9,0	5,1-18,4
<b>Тип переходный</b>	<b>126</b>	<b>2,2-13,7</b>	<b>6,9-51,5</b>	<b>3,3-33,1</b>	<b>11,7-52,5</b>	<b>8,6-33,2</b>	<b>0,0-15,9</b>	<b>1,9-23,9</b>
<i>Группа древесная</i>	17	3,2-12,1	9,4-31,4	4,9-14,3	33,8-52,0	12,2-33,2	0,3-2,9	7,0-22,7
Древесный	17	3,2-12,1	9,4-31,4	4,9-14,3	33,8-52,0	12,2-33,2	0,3-2,9	7,0-22,7
<i>Группа древесно-травяная</i>	16	3,4-12,3	11,5-34,9	5,9-18,6	28,7-52,5	8,6-23,2	1,6-4,6	6,3-19,6
Древесно-осоковый	8	3,4-12,3	13,8-28,3	7,2-17,0	30,1-49,4	10,4-23,2	1,6-3,8	7,8-13,2
<i>Группа древесно-моховая</i>	10	3,1-13,7	6,9-25,9	3,3-13,6	28,6-51,2	10,3-29,4	0,8-3,3	7,7-17,7
Древесно-сфагновый	10	3,1-13,7	6,9-25,9	3,3-13,6	28,6-51,2	10,3-29,4	0,8-3,3	7,7-17,7
<i>Группа травяная</i>	53	2,2-12,6	11,5-51,5	5,1-22,4	11,7-50,3	8,7-19,1	1,6-15,9	1,9-23,9
Шейхцериевый	26	2,2-10,1	15,6-51,5	8,5-22,4	11,7-46,2	8,7-46,2	2,0-14,4	4,3-23,9
Осоковый	26	2,9-12,6	11,5-40,2	5,1-20,7	26,8-50,3	11,3-19,1	1,6-5,6	7,4-17,8
<i>Группа травяно-моховая</i>	15	2,9-7,8	12,6-40,8	7,2-28,7	25,9-50,9	13,3-25,4	0,0-7,3	4,8-18,1
Осоково-сфагновый	13	2,9-7,5	12,6-40,8	7,2-28,7	25,9-50,9	13,4-25,3	0,0-7,3	4,8-12,8
<i>Группа моховая</i>	15	2,6-8,4	10,8-51,0	8,6-33,1	15,6-49,0	14,0-23,1	1,4-12,0	3,5-14,5
Гипновый	3	2,8-4,3	10,8-26,4	8,6-15,6	38,9-49,0	15,3-20,4	1,4-3,8	6,9-13,8
Сфагновый	12	2,6-8,4	22,9-51,0	12,9-33,1	15,6-40,2	14,0-23,1	1,7-12,0	3,5-14,5
<b>Тип верховой</b>	<b>376</b>	<b>1,2-17,7</b>	<b>9,0-63,1</b>	<b>4,1-42,4</b>	<b>4,6-49,9</b>	<b>10,0-30,4</b>	<b>0,7-20,7</b>	<b>0,0-21,1</b>
<i>Группа древесная</i>	12	6,8-16,3	10,3-24,7	4,1-16,2	28,7-49,9	12,0-22,5	0,7-4,7	8,7-14,3
Сосновый	12	6,8-16,3	10,3-24,7	4,1-16,2	28,7-49,9	12,0-22,5	0,7-4,7	8,7-14,3
<i>Группа древесно-травяная</i>	18	9,0-17,7	9,0-32,5	5,9-20,5	25,9-49,3	12,3-21,6	1,0-5,6	5,5-12,3
Сосново-пушицевый	18	9,0-17,7	9,0-32,5	5,9-20,5	25,9-49,3	12,3-21,6	1,0-5,6	5,5-12,3
<i>Группа древесно-моховая</i>	13	6,1-13,4	11,0-32,5	7,6-21,8	26,1-45,7	11,6-30,4	0,9-7,3	4,8-12,3
Сосново-сфагновый	13	6,1-13,4	11,0-32,5	7,6-21,8	26,1-45,7	11,6-30,4	0,9-7,3	4,8-12,3

## Окончание прил. 2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>Группа травяная</i>	45	5,3-15,7	11,6-41,6	5,6-27,4	17,6-46,7	11,2-24,6	1,5-10,7	5,7-21,1
Пушицевый	20	6,4-15,7	11,6-32,4	5,6-21,4	23,2-46,7	11,2-24,6	1,5-9,6	5,7-13,0
Шейхцериевый	25	5,3-14,1	11,8-41,6	6,1-27,4	17,6-43,1	13,3-20,9	2,1-10,7	7,7-21,1
<i>Группа травяно-моховая</i>	74	2,1-16,1	15,4-49,8	7,8-30,7	10,5-49,9	12,3-23,7	1,5-12,4	3,7-14,5
Пушицево-сфагновый	47	2,1-16,1	15,9-45,9	10,0-29,2	10,5-49,9	12,3-22,3	1,5-9,9	3,7-14,5
Шейхцерицево-сфагновый	27	3,2-12,7	15,4-49,8	7,8-30,7	11,8-42,7	12,8-23,7	2,6-12,4	6,7-12,8
<i>Группа моховая</i>	214	1,2-13,4	20,9-63,1	6,6-42,4	4,6-38,9	10,0-24,0	0,9-20,7	0,0-13,5
Фускум-торф	54	1,5-7,1	20,9-61,4	8,1-34,1	6,6-36,1	10,9-27,3	0,9-10,5	2,7-12,6
Медиум-торф	92	1,8-11,7	24,2-58,3	11,6-36,8	4,8-38,9	10,8-24,0	3,5-20,7	2,0-11,7
Комплексный	47	1,7-13,4	25,3-60,8	6,6-39,6	4,6-34,1	11,4-23,5	2,5-14,8	2,6-13,5
Сфагново-мочажинный	22	1,2-9,9	23,8-63,1	15,6-42,4	4,8-38,3	10,0-19,3	3,8-17,9	0,0-8,7

Приложение 3

Общетехнические свойства торфа (средние значения показателей)

Тип, группа, вид торфа	Степень разложения $R, \%$	Зольность сухого вещества, $A^c, \%$	Кислотность соляной вытяжки рН	Теплота сгорания горючей массы, $Q^f_6$ , ккал/кг
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<b>Тип низинный</b>	34	7,6	5,1	5 550
<i>Группа древесная</i>	45	9,6	5,3	5 540
Древесный	45	9,2	5,8	5 570
Ольховый	47	10,6	5,4	5 510
Березовый	45	10,8	5,4	5 420
Еловый	46	9,4	5,2	5 580
Сосновый	44	8,6	5,2	5 580
Ивовый	40	7,7	5,6	5 390
<i>Группа древесно-травяная</i>	39	8,0	5,0	5 630
Древесно-осоковый	37	7,8	5,1	5 600
Древесно-тростниковый	41	8,4	5,0	5 650
<i>Группа древесно-моховая</i>	35	7,8	5,0	5 570
Древесно-гипновый	36	8,8	5,4	5 580
Древесно-сфагновый	34	7,1	4,8	5 570
<i>Группа травяная</i>	29	6,7	5,0	5 580
Хвощовый	41	10,9	4,4	5 480
Тростниковый	37	9,5	5,2	5 580
Вахтовый	31	7,9	4,8	5 670
Осоковый	27	5,9	5,1	5 550
Шейхцериевый	26	4,3	4,7	5 680
<i>Группа травяно-моховая</i>	24	5,6	4,8	5 510
Осоково-гипновый	24	5,6	5,0	5 490
Осоково-сфагновый	25	5,6	4,5	5 520
<i>Группа моховая</i>	21	6,5	4,9	5 420
Гипновый	21	6,5	5,0	5 420
Сфагновый	20	6,5	4,8	5 410
<b>Тип переходный</b>	31	4,7	4,1	5 670
<i>Группа древесная</i>	45	6,8	4,6	5 790
Древесный	45	6,8	4,6	5 790
<i>Группа древесно-травяная</i>	39	4,8	4,1	5 870

Продолжение прил. 3

1	2	3	4	5
Древесно-осоковый	39	4,7	4,1	5 860
<i>Группа древесно-моховая</i>	38	7,1	4,6	5 750
Древесно-сфагновый	38	7,1	4,6	5 750
<i>Группа травяная</i>	29	3,5	3,9	5 690
Шейхцериевый	30	3,3	3,9	5 680
Осоковый	28	3,8	4,0	5 680
<i>Группа травяно-моховая</i>	27	4,9	4,0	5 590
Осоково-сфагновый	29	4,7	4,0	5 600
<i>Группа моховая</i>	22	4,7	4,1	5 400
Гипновый	19	6,3	4,7	5 500
Сфагновый	22	4,5	4,0	5 380
<b>Тип верховой</b>	23	2,4	3,3	5 340
<i>Группа древесная</i>	55	3,8	3,6	5 940
Сосновый	55	3,8	3,6	5 940
<i>Группа древесно-травяная</i>	51	2,8	3,2	6 010
Сосново-пушицевый	51	2,8	3,2	6 010
<i>Группа древесно-моховая</i>	38	3,5	3,5	5 760
Сосново-сфагновый	38	3,5	3,5	5 760
<i>Группа травяная</i>	37	2,6	3,5	5 700
Пушицевый	45	2,7	3,3	5 790
Шейхцериевый	29	2,6	3,7	5 610
<i>Группа травяно-моховая</i>	30	2,3	3,3	5 560
Пушицево-сфагновый	33	2,3	3,3	5 570
Шейхцериево-сфагновый	27	2,3	3,4	5 560
<i>Группа моховая</i>	13	2,3	3,2	5 100
Фускум-торф	11	2,4	3,2	4 990
Медиум-торф	15	2,1	3,1	5 140
Комплексный	13	2,2	3,2	5 120
Сфагнуво-мочажинный	10	2,6	3,2	5 060

## Краткая характеристика основных видов сапропелей

Вид сапропеля	Внешний вид образца	При микроскопическом исследовании
1	2	3
Торфянистый	От серовато-коричневого до бурого с оливковым оттенком, грубодетритовый с растительными остатками	Отчетливо просматриваются остатки высших растений и мхов. Встречаются остатки сфагновых и гипновых мхов, корешки осок, хвоща, тростника, кувшинок, древесные остатки
Гумусированный	Темно-коричневый, почти черный, зернистый или грубодетритовый с растительными остатками	Большое содержание бурых, почти черных пятен гумуса. Много растительных остатков, характерных для торфянистого сапропеля
Зоогеновый	Серовато-коричневый или коричнево-оливковый, мелкозернистый	Преобладают остатки животных: раковины, головные щиты, антенны и т. п.
Цианофицийный	Серо-коричневый, детритовый с растительными остатками	Среднее увеличение на фоне аморфного детрита дает возможность увидеть преобладание сине-зеленых водорослей ( <i>Gloeocapsa</i> , <i>Anabaena</i> ) и нитчатых. Часто присутствуют протококковые водоросли
Протококковый	Темно-оливковый или буровато-оливковый, зернистый или желеобразный	При малом увеличении четко различаются <i>Pedastrum</i> , при среднем – обилие <i>Scenedesmus</i> или <i>Tetraedron</i> . Присутствуют сине-зеленые или хризомонадовые водоросли
Хризомонадовый	Светло-оливковый или серовато-оливковый зернистый или пастообразный	Цисты хризомонад присутствуют в большом количестве. Всегда имеется некоторое количество диатомовых вместе с губками
Смешанно-водорослевый		Наряду с диатомовыми примерно в равном количестве присутствуют протококковые и хризомонады, реже – сине-зеленые водоросли



1	2	3
Диатомовый		Преобладают диатомовые ранозрелые виды
Кремнеземистый	Зеленовато-серый или коричневатый пастообразный	Характерно наличие диатомовых, иногда вместе с цистами хризомонад. Часто присутствуют губки
Известковистый	Светло-серый, почти белый. Встречаются также желтоватые и розовые. Вскипает при попадании соляной кислоты	Сплошной серый фон мелких частиц извести. Часто присутствуют обизвесткованные оболочки факотусовых водорослей
Железистый	Черный, иногда зеленовато-черный с металлическим оттенком и мелкими блестками включений. На воздухе быстро окисляется и покрывается ржавчиной	В отличие от гумусированного сапропеля черные пятна гидроилита имеют более резкие очертания, а фон – зеленоватый. Изредка встречаются диатомовые. Растительных остатков мало
Глинистый	Сероватый или серовато-коричневый до шоколадного и розового. Пластичен, прилипает к рукам, мажется	Четко видны мелкие округлые и остроугольные глинистые частицы. Встречаются остатки диатомовых, протококковых и губки
Песчанистый	Сероватый, с заметными на глаз песчинками. При разминании на пальцах остается песок	Хорошо видны крупные округлые песчаные и каменистые частицы. Нередко присутствуют губки, а также остатки высших растений

Приложение 5

Плотность низинного неуплотненного торфа в залежи

Влажность торфа, %	Плотность торфа (кг/м <sup>3</sup> ) при степени разложения, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
96	940	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
94	730	990	–	–	–	–	–	–	–	–	–
92	600	850	1050	–	–	–	–	–	–	–	–
90	510	740	860	940	1010	1040	–	–	–	–	–
88	440	650	780	860	930	960	990	1020	1040	–	–
86	390	590	710	790	860	890	930	950	980	990	1020
84	350	530	650	730	800	830	870	900	920	940	970
82	310	490	600	680	740	780	820	850	870	890	920
80	290	450	570	630	700	740	770	800	820	850	880
78	260	420	520	590	660	700	730	760	790	810	840
76	240	390	490	560	620	660	700	730	750	770	810
74	230	360	460	530	590	630	660	690	720	740	770
72	210	340	430	500	560	600	630	660	690	710	740
70	200	330	410	480	530	570	610	630	660	680	720
68	190	310	390	450	510	550	580	610	630	660	690
66	180	290	370	430	490	520	560	590	610	630	670
64	170	280	350	410	470	500	540	560	590	610	650
62	160	260	340	400	450	480	520	540	570	590	620
60	150	250	330	380	430	470	500	530	550	570	600

Приложение 6

Плотность верхового неуплотненного торфа залежи

Влажность торфа, %	Плотность торфа (кг/м <sup>3</sup> ) при степени разложения, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
98	1040	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
96	850	1050	–	–	–	–	–	–	–	–	–
94	680	910	990	1080	–	–	–	–	–	–	–
92	570	790	900	1030	1060	–	–	–	–	–	–
90	490	710	820	900	960	1000	1010	1050	–	–	–
88	430	640	750	840	890	930	970	990	1010	1030	–
86	380	580	700	780	840	880	920	940	970	980	1030
84	340	530	650	730	790	830	870	900	930	940	970
82	310	490	610	690	750	790	830	860	880	900	940
80	290	460	570	650	710	750	770	820	850	870	900
78	270	430	530	610	670	720	760	790	810	830	870
76	250	400	510	580	640	690	720	750	780	800	840
74	230	380	480	550	610	660	700	730	750	780	810
72	220	350	460	530	580	630	670	700	730	750	790
70	200	340	440	500	560	610	640	670	700	720	760

## Характеристика смолистой части воска

Температура, °С	После экстракции	Выход смол, % к сырому воску	Содержание в смоле, % к навеске смолы			Число		
			воска	«парафинов»	смолы	кислотное	омыления	йодное
-10	Первое	8,4	0	0	100	8	49	58
	Второе	6,4	0	0	100	10	45	56
	Третье	2,8	0	0	100	9	43	58
	Четвертое	2,1	0	4,2	95,7	9	41	57
	Пятое	1,8	0	10,4	89,5	9,1	37	51
-5	Первое	12,1	0	0	100	12	48	56
	Второе	5,3	0	0	100	13	44	51
	Третье	2,8	0	16,3	83,7	13	42	54
	Четвертое	1,5	0	18,5	71,5	15	38	54
	Пятое	1,2	0	34,2	65,8	15	38	50
0	Первое	13,8	0	5,2	94,8	13	50	55
	Второе	4,3	0	8,4	91,6	3	48	56
	Третье	2,7	0	40,3	59,7	14	41	55
	Четвертое	2,9	0	44,2	55,8	13	41	53
	Пятое	2,3	0	40,8	59,2	14	40	52
5	Первое	17,7	0	6,3	93,6	12	43	53
	Второе	5,4	0	8,1	91,8	10	42	51
	Третье	2,9	0	42,3	57,7	7	51	46
	Четвертое	2,1	3,5	42,8	53,7	8	40	47
	Пятое	1,4	2,2	48,4	49,4	8	40	48
10	Первое	19,9	2,3	6,7	90,7	16	51	45
	Второе	6,9	2,2	9,4	88,4	12	51	43
	Третье	4,3	4,4	45,2	50,8	8	40	40
	Четвертое	2,1	6,7	47,4	45,9	7	39	40
	Пятое	1,8	5,3	44,9	49,8	8	39	38
15	Первое	30,1	7,3	6,2	36,5	11	50	43
	Второе	4,4	15,5	8,3	76,2	10	48	40
	Третье	3,9	14,2	34,4	51,3	11	46	40
	Четвертое	1,5	15,2	28,1	56,7	10	44	38
	Пятое	0,8	10,4	39,7	57,8	12	42	32

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лиштван, И.И. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И.И. Лиштван, А.А. Терентьев, Е.Т. Базин, А.А. Головач. Минск: Наука и техника, 1983. 232 с.
2. Мисников, О.С. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие // О.С. Мисников, В.А. Беляков, О.В. Шамбер. Тверь: ТГТУ, 2008. 160 с.
3. Раковский, В.Е. Химия и генезис торфа / В.Е. Раковский, Л.В. Пигулевская. М.: Недра, 1978. 230 с.
4. Камнева, А.И. Химия горючих ископаемых / А.И. Камнева. М.: Химия, 1974. 272 с.
5. Русчев, Д.Д. Химия твердого топлива / Д.Д. Русчев. Л.: Химия, 1976. 254 с.
6. Тюремнов, С.Н. Торфяные месторождения / С.Н. Тюремнов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 488 с.
7. Раковский В. Е. Биогеохимические основы генезиса топлива. Мн.: Вести АН БССР, 1954, № 6. С. 37–54.
8. Раковский, В.Е. Биологически активные вещества торфа: В кн.: Химия и химическая технология // Труды КПИ, 1967. Вып. 3(16). С. 9–16.
9. Тюремнов, С.Н. Растительные группировки торфяных месторождений и химический состав их водной среды / С.Н. Тюремнов, И.Ф. Ларгин // Торфяная промышленность. 1968, № 2. С. 21–24.
10. Антонов, В.Я. Технология и комплексная механизация торфяного производства: учеб. пособие для вузов / В.Я. Антонов, В.Д. Копенкин. М.: Недра, 1983. 287 с.
11. Болтушкин, А.Н., Гидротехника: учебное пособие / А.Н. Болтушкин, О.В. Пухова, А.Е. Тимофеев. Изд. 1-е, Тверь: ТГТУ, 2013. 160 с.
12. Мисников, О.С. Процессы переработки торфа и сапропеля: учебное пособие / О.С. Мисников, О.В. Пухова. Тверь: ТГТУ, 2014. 164 с.
13. Лиштван, И. И. Рационально использовать торфяные ресурсы БССР // Торфяная промышленность, 1982. № 1. С. 7–9.
14. Тановицкий, И.Г. Комплексное использование торфа на основе биотермохимического синтеза / И.Г. Тановицкий // Машины и технология торфяного производства. Мн., 1979. С. 129–136.
15. Лазарев, А.В. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М.: Недра, 1982. 760 с.
16. Технический анализ торфа / Е.Т. Базин, В.Д. Копенкин, В.И. Косов [и др.]. М.: Недра, 1992. 431 с.
17. Гамаюнов, Н.И. Тепло- и массоперенос в торфяных системах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н.И. Гамаюнов. Калинин, 1967. 41 с.
18. Амарян, Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов / Л.С. Амарян. М.: Недра, 1969. 191 с.
19. Лундин, К.П. Зависимость объемного веса торфяной залежи от влажности / К.П. Лундин // Труды Института торфа АН БССР, 1955. Т. 4. С. 163–187.

20. Корчунов, С.С. Исследование физико-механических свойств торфа / С.С. Корчунов // Труды ВНИИТП. М.; Л., 1953. Вып. 12. 235 с.
21. Власов, В.П. Насыпной вес кускового торфа / В.П. Власов // Торфяная промышленность, 1972. № 10. С. 19–20.
22. Шифрин, В.Л. Объемный вес фрезерного торфа в караванах / В.Л. Шифрин, С.А. Сидякин // Торфяная промышленность, 1952. № 5. С. 13–14.
23. Воларович, М.П. Исследования свойств торфа и протекающих в нем процессов при помощи радиоактивных изотопов / М.П. Воларович, Н.В. Чураев. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 130 с.
24. Качинский, Н.А. Физика почвы: в 2 частях. Часть 2 / Н.А. Качинский. М.: Высшая школа, 1970. 358 с.
25. Ребиндер, П.А. Капиллярные явления / П.А. Ребиндер // Физический энциклопедический словарь. М., 1962. С. 277–288.
26. Покровский, Г.И. О влиянии адсорбированных на частицах грунта оболочек на сцепление грунта // Труды КПИ. Вып. 11, 1960. С. 166–182.
27. Афанасьев, А.Е. Изучение структурообразования при сушке крошкообразного торфа / А.Е. Афанасьев // Коллоидный журнал, 1978. № 5. С. 848–857.
28. Корчунов, С.С. Изучение водного режима осушенных торфяных залежей: в 2 частях. Ч. 1. Определение степени осушенности торфяных полей / С.С. Корчунов, И.И. Могилевский, О.Н. Абакумов и др.; под ред. А.А. Соколова // Труды ВНИИТП. М.; Л., 1960. Вып. 17. 102 с.
29. Герсеванов, Н.М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин. М.: Стройиздат, 1948. 247 с.
30. Сергеев, Ф.Г. Исследование водопоглотительных свойств мелкокусового торфа и торфяной подстилки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ф.Г. Сергеев. Калинин, 1970. 23 с.
31. Сидякин, С.А. Полная влагоемкость торфа / С.А. Сидякин // За торфяную индустрию, 1939. № 9. С. 31–32.
32. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. М.: Химия, 1978. 544 с.
33. Белосельский, Б.С. Энергетическое топливо / Б.С. Белосельский, В.К. Соляков. М.: Энергия, 1980. 168 с.
34. Горшенина, Г.И. Полимер-битумные изоляционные материалы / Г.И. Горшенина, Н.В. Михайлов. М.: Недра, 1967. 235 с.
35. Воларович, М.П. Рентгеноструктурные исследования торфяных битумов и восков / М.П. Воларович, К.Ф. Гусев // Коллоидный журнал, 1956. Т. 18. Вып. 6. С. 643–646.
36. Жукова, В.П. Исследование реологических свойств торфяного воска / В.П. Жукова, И.И. Лиштван // Коллоидный журнал, 1974. Т. 36. Вып. 4. С. 774–776.
37. Терентьев, А.А. Исследования структуры торфа / А.А. Терентьев, В.И. Суворов; Под ред. И. И. Лиштвана. Мн.: Наука и техника, 1980. 96 с.
38. Смольянинов, С.И. Термобрикетиование торфа / С.И. Смольянинов, С.Г. Маслов. Томск, 1975. 108 с.
39. Цыбулькин, В.М. Исследование бензольных и спирто-бензольных экстрактов растений-торфообразователей низинных и верховых болот / В.М. Цыбулькин, П.И. Белькевич // Вести АН БССР. Сер. хим. наук, 1969. № 4. С. 80–83.

40. Раковский, В.Е. Общая химическая технология торфа / В.Е. Раковский. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. 363 с.
41. Торфяной воск и сопутствующие продукты / под общ. ред. чл.-кор. АН БССР П.И. Белькевича. Мн.: Наука и техника, 1977. 232 с.
42. Жукова, В.П. Исследование корреляционных связей между отдельными признаками торфа и созданием битумов / В.П. Жукова, Н.Т. Король, И.И. Лиштван // Химия твердого топлива, 1972. № 5. С. 122–127.
43. Лиштван, И.И. Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король. Мн.: Наука и техника, 1975. 320 с.
44. Howard A.J., Namer D.J. Of the American Oil Chemist Society. 1960. T. 37. P. 478
45. Раковский, В.Е. Общая химическая технология торфа / В.Е. Раковский. М.; Л., 1949. 363 с.
46. Торфяной воск и сопутствующие продукты / П.И. Белькевич, К.А. Гай-дук, Т.Т. Зуев, Л.А. Иванова [и др.]. Минск: Наука и техника, 1977. 232 с.
47. Матрос, Ю.Ш. Каталитические процессы в нестационарных условиях Ю.Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1987. 432 с.
48. Камнева, А.И. Химия горючих ископаемых / А.И. Камнева. М.: Недра, 1974. 272 с.
49. Кутепов, А.М. Общая химическая технология / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. М.: Высшая школа, 1990. 520 с.
50. Горфин, О.С. Технология переработки торфа / О.С. Горфин, В.С. Зайцев. М.: Недра, 1986. 247 с.
51. Наумович, В.М. Искусственная сушка торфа / В.М. Наумович. М.: Недра, 1984. 222 с.
52. Зайцев, В.С. Технология переработки торфа / В.С. Зайцев. Калинин: КГУ, 1988. 76 с.
53. Раковский, В.Е. Химия пирогенных процессов / В.Е. Раковский, Ф.Л. Каганович, Е.А. Новичкова. Мн.: АН БССР, 1959. 208 с.
54. Лис, Л.С. Разработка устройств для автоматического измерения влажности торфа в производственных процессах на основе исследования его электрических свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.С. Лис. Мн., 1972. 22 с.
55. Лопотко, М.З. Сапропели БССР, их добыча и использование / М.З. Лопотко. Мн.: Наука и техника, 1974. 208 с.
56. Алтунина, Г.С. Сапропели. Ресурсы, технологии добычи и переработки. Область применения. Зарубежный опыт / под ред. Г.С. Алтуниной // Информационно-патентный обзор: М., 1993. 176 с.
57. Лопотко, М.З. Озера и сапропель / М.З. Лопотко. М.: Наука и техника, 1978. 88 с.
58. Лопотко, М.З. Использование сапропелей в народном хозяйстве СССР и за рубежом / М.З. Лопотко, Н.В. Кислов. М.: Недра, 1990. 83 с.
59. Рубинштейн, А.Я. История развития озер и прогнозные запасы сапропелей / А.Я. Рубинштейн // История современных озер. Ленинград; Таллин, 1986. С. 19–21.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Характеристика торфяного сырья.....	5
1.1. Генезис торфа. Общие представления о составе и свойствах торфяного сырья .....	5
1.2. Общие представления о торфе .....	11
1.3. Характеристика мировых запасов торфяного сырья.....	20
1.4. Классификация и основные направления использования торфяных ресурсов .....	31
2. Физико-технические свойства торфа.....	34
2.1. Плотность сухого вещества торфа .....	34
2.2. Плотность торфа, торфяной продукции и методы ее определения.....	37
2.3. Пористость торфа.....	44
2.4. Капиллярное давление воды в торфе .....	46
2.5. Водопоглощаемость и полная влагоемкость торфа.....	55
2.6. Теплота сгорания торфа.....	60
3. Селективная экстракция битумных компонентов и их переработка.....	66
3.1. Теоретические основы получения битумов из торфа.....	66
3.2. Растворимость сырого торфяного воска в растворителях .....	81
3.3. Заводской способ получения торфяного воска .....	90
3.4. Модификация торфяного воска.....	94
3.5. Этерификация торфяного воска .....	101
4. Характеристика сапропелей .....	107
4.1. Влажность.....	109
4.2. Физико-механические свойства .....	114
4.3. Реологические свойства .....	120
4.4. Естественная радиоактивность .....	126
4.5. Основные физические свойства сапропелевой пульпы .....	127
5. Химический и микробиологический состав сапропелей .....	132
5.1. Зольность.....	132
5.2. Химический состав минеральной части.....	135
5.3. Элементарный состав.....	138
5.4. Групповой состав.....	141
5.5. Микроэлементы.....	144
5.6. Микробиологический состав и биологическая активность.....	149
Приложения.....	153
Библиографический список.....	164

Мисников Олег Степанович  
Пухова Ольга Владимировна  
Черткова Елена Юрьевна

Физико-химические основы торфяного производства

*Учебное пособие*

Редактор Е.Н. Спиридонова  
Корректор М.Б. Юдина  
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

---

Подписано в печать 17.12.2015

Формат 60 x 84/16

Физ. печ. л. 10,5

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 9,77

Заказ № 112

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 9,14

С – 105

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22