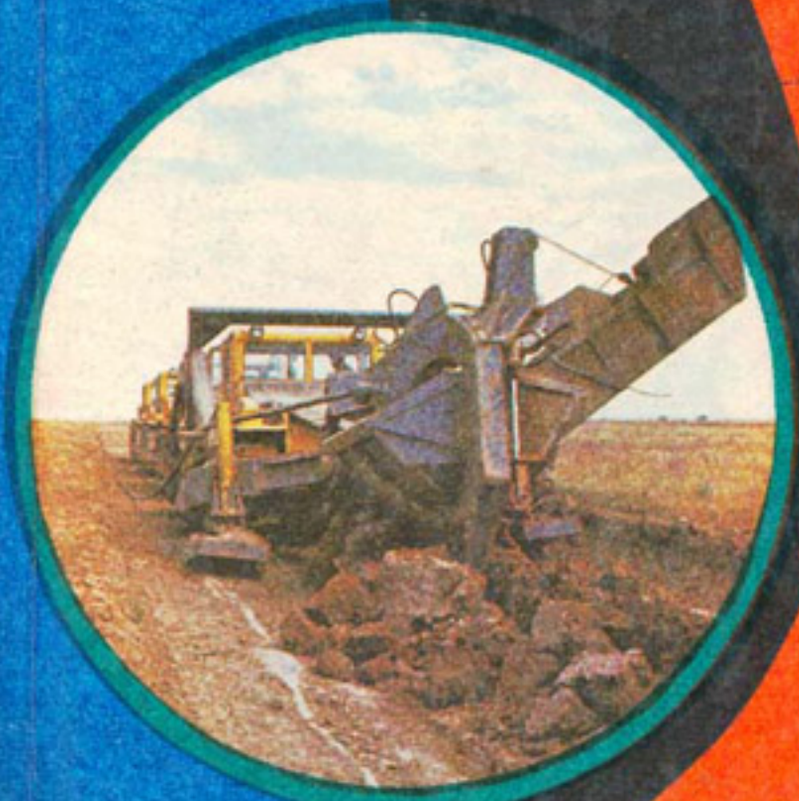
ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ДРЕНАЖ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ



631.6
Г69
УДК 631.626

АВТОРЫ:

В. А. Духовный,
М. Б. Баклушин,
Е. Д. Томин,
Ф. В. Серебренников

Под редакцией
В. А. Духовного

Г $\frac{40305-225}{035(01)-79}$ 61—79. 3802030000

© Издательство «Колос», 1979

ВВЕДЕНИЕ

Орошение и дренаж... Казалось бы, как можно представить себе вместе эти два антагонистических по цели мероприятия. Одно призвано устранить естественный недостаток воды в почве для нормального развития сельскохозяйственных культур, другое — отвести из корнеобитаемой толщи излишки воды, мешающие произрастанию растений. Длительное время так и считалось, что орошение — это удел засушливых, пустынных и полупустынных местностей, а дренаж необходим в зоне переувлажнения, где осадки преобладают над естественным испарением и водопотреблением культурной и дикой растительностью.

Между тем в зонах аридного климата, характеризующихся резким недостатком влаги и исключительно высоким испарением, орошение, создавая необходимое увлажнение, в то же время значительно изменяет естественные гидрогеологические, почвенные и другие условия. Оно нарушает равновесие в них и нередко приводит к интенсивному засолению активной толщи почвогрунтов. Причина здесь кроется либо в недостаточности естественного оттока для условий орошения, либо в его изменении под влиянием оросительных или других сооружений, либо в резком увеличении под действием орошения извне притока грунтовых вод на данную территорию. Переувлажнение и особенно засоление значительно снижают эффективность сельскохозяйственного производства на орошаемых землях и сводят зачастую на нет то высокое плодородие, которое создается при орошении. Поэтому дренаж орошаемых земель необходим как средство борьбы с воз-

можными вредными явлениями, порождаемыми или усиливаемыми орошением, — засолением и заболачиванием. При этом орошение и дренаж должны рассматриваться как средства регулирования водного, воздушного, солевого и отчасти теплового, питательного и газового режимов почвогрунтов в интересах создания оптимальных условий для развития и усиления производства сельскохозяйственных культур.

В зависимости от характера движения воды к дренам и расположения водоприемной части различают два метода дренирования земель: с помощью горизонтального и вертикального дренажа.

Горизонтальный дренаж орошаемых земель как в теоретическом, так и в практическом смысле имеет много общего с дренажем в зоне осушения (конструкции, методы строительства, принципы гидравлического расчета трубчатых линий и др.). Но имеются и принципиальные отличия, которые коренным образом делают горизонтальный дренаж орошаемых земель специфическим инженерным сооружением. Основа этих различий в особенностях природных условий (высокая испаряемость, большой дефицит влаги, развитые капиллярные свойства почвогрунтов, засоление почв, грунтов и грунтовых вод). Поэтому дренаж на орошаемых землях отличается от дренажа в зоне осушения значительно большей глубиной (2,5—3,5 м вместо 0,8—1,2 м), меньшей интенсивностью, намного большими расчетными расходами и отсюда диаметрами трубопроводов, почти обязательным наличием в конструкции дрен фильтровой обсыпки и, главное, задачей регулирования не только водного, но и солевого режима земель.

По горизонтальному дренажу предстоит провести большие работы. Определяется это тем, что намеченная программа развития орошения в нашей стране, особенно в аридной и полуаридной зонах, осуществляется в основном на землях, засоленных или подверженных засолению, так как большинство массивов естественно плодородных

и дренированных земель уже освоены ранее. На землях Джизакской, Каршинской степей, зон Каракумского и Арысь-Туркестанского каналов, низовья Амударьи и Сырдарьи, большей части Поволжья, Крыма, Южной Украины, Закавказья необходимо строить горизонтальный закрытый дренаж с удельной густотой 30—60 м/га. При ежегодных темпах роста орошения новых земель в этих районах (250—300 тыс. га) только на новоорошаемых массивах потребуется закладывать около 10 тыс. км дрен в год. Не меньшие объемы работ надо будет выполнить при переустройстве существующих открытых дренажных систем (коллекторы и дрены) на закрытые. Сейчас удельная протяженность открытого дренажа в наиболее развитых районах орошения, таких как Средняя Азия, Азербайджан, составляет более 30—40 м/га. Поэтому обобщение опыта в исследованиях, проектировании, строительстве, эксплуатации закрытого горизонтального дренажа представляет большой интерес для мелиораторов и работников орошаемого земледелия. Этой задаче и посвящена данная работа.

В книге «Горизонтальный дренаж орошаемых земель» использован материал Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации им. В. Д. Журина, Среднеазиатского проектно-изыскательского и научно-исследовательского института «Средазгипроводхлопок» им. А. А. Саркисова, Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, а также опыт территориального управления Голодностепстрой и Главсредазирсовхозстроя по созданию систем горизонтального закрытого дренажа в Голодной, Каршинской и Сурхандарьинской степях, Ферганской долине, Таджикистане, Туркмении и других объектов.

Авторы опирались на основной объект — Голодную степь, так как на этом массиве построена и более 10 лет эксплуатируется крупнейшая в нашей стране система горизонтального закрытого дренажа площадью более 250 тыс. га интенсивно орошаемых земель.

Одновременно был использован материал по более поздним и меньшим (по площади) системам горизонтального закрытого дренажа в других гидрогеологических и почвенно-мелиоративных условиях нашей страны.

Введение, главы 1, 6, 7 и 8 написаны кандидатом технических наук В. А. Духовным, глава 2 — В. А. Духовным совместно с кандидатом физико-математических наук М. Б. Баклушиным, глава 4 — В. А. Духовным с кандидатом технических наук Ф. В. Серебренниковым при участии кандидата технических наук С. Н. Сторожук. Глава 3 подготовлена Ф. В. Серебренниковым, глава 5 — Е. Д. Томиным.

Авторы выражают благодарность лауреату Ленинской премии Е. И. Озерскому, С. М. Радченко, В. А. Орлову, И. П. Айдарову и Х. И. Якубову за помощь в работе над книгой и ценные замечания.

ГЛАВА 1

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ДРЕНАЖ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В СВЯЗИ С ИХ ПРИРОДНЫМИ УСЛОВИЯМИ И ЕГО РАЗВИТИЕ В СССР

Требования растений к водно-воздушному режиму почв

Для успешного произрастания растений необходимы вода и воздух. Вода формирует клетки растений, доставляя питательные вещества к ним. Аэрация почвы обеспечивает рост корневых систем, способствует развитию микрофлоры, усвоению питательных веществ из органических и минеральных удобрений, устраняет вредное действие ряда веществ, удаляет углекислый газ и др.

Излишнее переувлажнение почв приводит к нарушению воздушного питания и к угнетению, если не к гибели растений. По данным Н. С. Петинова, для большинства растений оптимальным является такое увлажнение, при котором воздухом заполнены около 15% всех пор. По некоторым зарубежным данным, оптимум достигается при 10—12%, что приблизительно соответствует известным пределам влажности от 100 до 70—75% ППВ для различных культур (за исключением таких влаголюбивых культур, как рис). В нашей стране и за рубежом достаточно данных, определяющих оптимальную глубину грунтовых вод, которая обеспечивает необходимое сочетание водного и воздушного режимов для растений за счет капиллярного подпитывания.

Оптимальное количество влаги, необходимое растению, может быть получено им из почвы, осадков, оросительной воды, запасов влаги в почве, созданных орошением либо подпитыванием из грунтовых вод за счет капиллярного увлажнения (субирригация). Считается, что наилучшее увлажнение достигается при последнем способе. Поэтому для получения максимального урожая рекомендуют поддерживать близкое залегание грунтовых вод. Дело в том, что при субирригации растение бесперебойно может питаться влагой из капиллярных запасов, если интенсивность подпитывания и водно-физические свойства грунтов позволяют это. При этом стрессовых явлений,

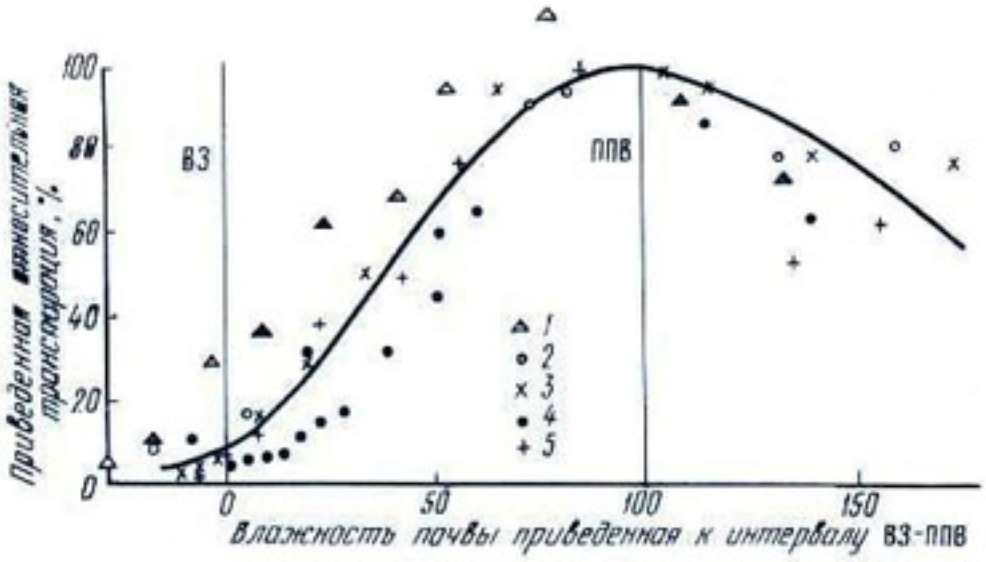


Рис. 1. Приведенная характеристика доступности растениям почвенной влаги (по С. И. Долгову):

1 — подзолистая почва; *2* — чернозем; *3* — каштановая почва; *4* — краснозем; *5* — серозем.

вызванных снижением влажности ниже оптимальных пределов, не наблюдается. При искусственном орошении, скажем, дождеванием или поверхностным способом, если почва увлажняется достаточно часто и колебания влажности находятся в оптимальных пределах, растения также не испытывают стрессовых явлений (торможение питания, рост и др.).

Исследованиями С. И. Долгова, А. А. Роде и других установлено, что по мере уменьшения влажности в почве от предельной полевой влагоемкости (ППВ) к влажности завядания (ВЗ) доступность влаги к самому растению снижается. Поэтому оптимум увлажнения, как это видно из рисунка 1, находится в пределах 70—105% запасов доступной влаги (имея в виду разность между ППВ и ВЗ). На рисунке 1 четко прослеживается, что увлажнение сверх ППВ также отрицательно влияет на характер водного питания растений.

Исходя из указанного, одна из задач мелиорации в зоне орошения состоит в том, чтобы не только дать воду орошаемым землям, но и обеспечить увлажнение в строго необходимых пределах, оптимальных для растений. Поэтому заболачивание орошаемых земель вследствие переполива, избыточного увлажнения, подъема уровня грунтовых вод должно быть предотвращено регулированием водно-воздушного режима почвогрунтов с помощью системы поливов и дренажа.

Анализируя опыт орошения земель, можно отметить, что заболачивание наносит большой ущерб орошаемому земледелию, снижая урожайность. Переувлажнение орошаемых земель наносит ущерб сельскохозяйственному производству еще и тем, что не позволяет проводить сельскохозяйственные работы в необходимые сроки, задерживает вегетационный цикл растений, уменьшает эффективность действия удобрений, гербицидов и т. д.

Соли и их влияние на развитие растений, засоление земель

Соли — одни из важнейших компонентов в системе почва — вода — растение. В. А. Ковда указывает на полезность минеральных солей для произрастания растений. Некоторые соли участвуют в синтезе новых органических веществ и полезны для растений, другие используются для механической прочности растительных волокон, увеличивают приспосабливаемость растений к климатическим условиям. Например, присутствие кальция улучшает агрегатную структуру почвогрунтов, препятствует их диспергированию и слитности. В. А. Ковда считает, что для водного и минерального питания растений оптимальной является концентрация водорастворимых солей в почвенных растворах 3—5 г/л. Аналогичные данные приводит К. Паливал на основе опытов индийских ученых по пшенице, люцерне и хлопчатнику. В результате обобщения материалов ряда исследований, проведенных в Средней Азии, В. А. Духовным получена зависимость урожайности хлопка-сырца от степени засоления почвогрунтов (рис. 2). Зависимость показывает, что урожайность не снижается до некоторого предела роста засоления, а после него она резко падает.

Повышение содержания солей в растворах сверх оптимального приводит к постепенно нарастающим отрицательным воздействиям их на растения, почву и другие элементы биосферы. В этом направлении проведены большие работы как зарубежными исследователями (Х. Говард, В. Остергаут, Л. Бернштейн и др.), так и советскими (П. А. Генкель, Б. П. Строганов, В. В. Кабанов, В. А. Ковда, С. Н. Рыжов).

Соли оказывают отрицательное влияние на растения: прямое (в виде повышения осмотического давления и токсического действия) и косвенное (в виде ухудшения

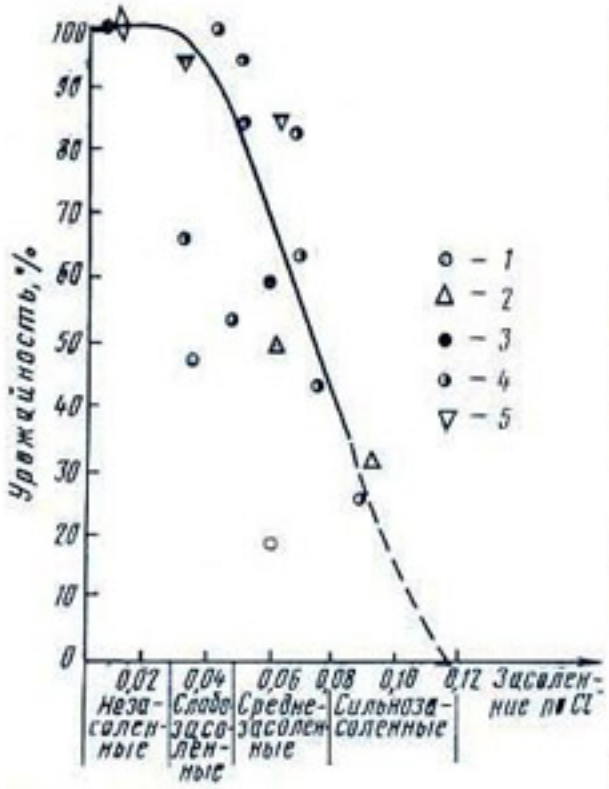


Рис. 2. Зависимость урожайности хлопчатника от засоления по хлору:

1 — по данным В. М. Легостаева; *2* — Х. И. Якубова; *3, 4* — И. К. Киселевой; *5* — И. С. Рабочева.

водно-физических свойств почвы). Механизм токсического действия солей, по общему мнению, состоит в нарушении водного режима растений, изменении в минеральном питании, подавлении фотосинтеза, в общем нарушении физиологического развития растений.

Х. Б. Петерсон продемонстрировал в своих опытах, что наряду с увеличением осмотического давления почвенного раствора соли, особенно натриевые, оказывают токсическое воздействие, ухудшая развитие растений, нарушая биохимические процессы и ионный баланс питательных веществ между растением и почвенным раствором.

Б. П. Строганов считает, что на растения преимущественно оказывает влияние токсичность отдельных ионов. Проведенные им и его сотрудниками работы позволили определить дифференцированное влияние отдельных элементов и микроэлементов на процессы развития растений. В частности, установлено, что сера имеет первостепенное значение в растении как компонент клетки, участвуя в окислительно-восстановительных процессах и энергетическом обмене. Недостаток серы снижает биосинтез аминокислот, а повышение содержания ее до предела токсичности исключает образование некоторых аминокислот в клетке.

При хлоридном засолении хлор мешает поглощению и передвижению сульфатов в растениях. При сульфатном засолении избыток сульфатов приводит к наличию в клетках недоокисленных серопроизводных, превращающихся в токсины.

С этим мнением не соглашается С. Н. Рыжов, доказывающий, что даже при отсутствии токсического действия увеличение осмотического давления резко снижает урожайность культур, так как разница осмотических

напряжений между средой и растением определяет интенсивность поглощения воды и питательных веществ. Соли же, постепенно накопленные в клетках растений, нарушают затем фитологические и метаболические процессы. Известно, что все растения наиболее подвержены действию солей в ранней стадии, то есть когда в самом растении они еще не успевают накопиться. Следовательно, на растения действует в основном осмотическое давление (рис. 3). Далее происходит замедление всходов, которое отражается на всех последующих стадиях развития до самого сбора и в конечном счете ведет к снижению урожая.

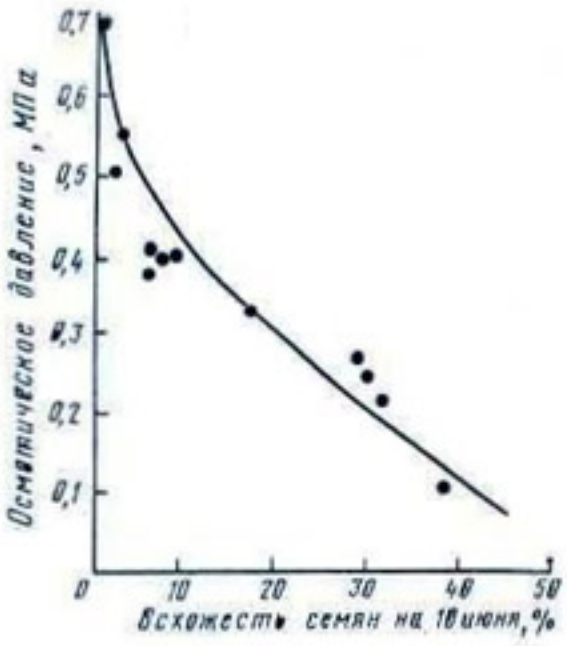


Рис. 3. Зависимость всхожести семян хлопчатника от осмотического давления почвенного раствора (по С. Н. Рыжову).

В. А. Ковда проводил наблюдения за хлопчатником с целью выяснения нарушений в питательном режиме. Минеральный остаток после прокаливания нормального хлопка, то есть выращенного на незасоленных землях, составлял 10—16%, а на засоленных землях — до 20%. При этом по сравнению с нормальным в хлопке с засоленных земель было больше SiO_2 в 4—5 раз, P_2O_5 — в 3—5 раз, Cl — в 2—3 раза, Mg и Na — в 2—3 раза и меньше Ca в 1,5—2 раза. Минеральных веществ в волокне этого хлопчатника было на 70% больше, чем в нормальном.

Повышение засоления и солонцеватости уменьшает урожайность сельскохозяйственных культур. По данным исследований Секретариата водных ресурсов Мексики, в ирригационном округе № 41 слабое засоление земель в среднем снижает урожай сельскохозяйственных культур на 5%, среднее — на 50, сильное — на 90, солончаки — на 100%.

По данным В. А. Ковды, слабое засоление уменьшает выход продукции на 20%, среднее — до 40—60% (без учета полного выпадения большинства культур на солончаковых пятнах на этих землях). По данным И. Бауманса, В. Хулсболса, в Ираке засоление орошаемых земель до

10 ммос/см по ECe снижает урожайность ячменя на 40%, до 18 ммос/см — на 65%.

Решение проблемы удовлетворения потребности человечества в пище и промышленности в сырье для большинства стран нашей планеты зависит от успешного использования существующих и освоения новых орошаемых земель.

На орошаемых площадях обеспечивается производство более 50% всей аграрной продукции земного шара. Огромные возможности орошаемого земледелия видны на примере Советского Союза, где средняя урожайность хлопка-сырца превысила 32 ц/га, риса —46 ц/га.

В то же время для многих стран с развитым орошением характерна значительно более низкая удельная продуктивность орошаемых земель, несмотря на благоприятные климатические условия. Так, в Индии урожайность риса составила в 1973—1974 гг. 14,5 ц/га, хлопка —9 ц/га, пшеницы —13,8 ц/га, в Пакистане соответственно 22,6; 10,4; 11,9 ц/га, в Иране —31,6; 9,0; 17,2 ц/га. Есть много причин, влияющих на такой уровень урожайности сельскохозяйственных культур (невысокая культура земледелия, недостаток удобрений, низкая степень механизации агротехнических процессов), но один из основных факторов низкой продуктивности орошаемых земель в ряде стран — засоление.

Если учесть, что в отдельных странах, например в Индии, засоление охватывает 20% орошаемых земель, а в Пакистане и Ираке — около половины, то становится ясно, что недобор урожая на засоленных землях ежегодно наносит человечеству огромный ущерб. По данным уже упомянутого выше исследования мексиканских мелиораторов, доход от рассоления земель составляет в среднем 1000—1100 песо на 1 га, или 130 долларов на 1 га. По данным В. А. Духовного, чистый доход от коренной мелиорации засоленных земель достигает в целом 200—500 руб. в год. Американские специалисты оценивают убытки от засоления с площади 1,6 млн. га в 350 млн. долларов, или в пределах 200 долларов на 1 га.

Засоление широко распространено во всем мире. Площадь засоленных земель разного типа на орошаемых массивах составляет около 20 млн. га*. Обзор, составлен-

---

* Международное руководство по орошению и дренажу засоленных земель. ФАО ЮНЕСКО, 1966 г.

ный Международной комиссией по ирригации и дренажу (МКИД) в 1973 г. и включивший данные по 23 странам с орошаемой площадью 87,8 млн. га, определяет площадь засоленных и подверженных засолению земель 28,4 млн. га. Если учесть и исправить допущенные в этом обзоре неточности (отсутствие засоленных земель в СССР, а фактически их 3,6 млн. га; по Египту приведены 225 тыс. га засоленных земель, в то время как, по данным доктора Кенави, их более 600 тыс. га) и добавить площади, охваченные засолением на орошаемых массивах других стран (Япония, Венгрия, Югославия, Чехословакия, Италия, Франция, Китай, Непал, Мексика и др.), то общая площадь орошаемых земель, засоленных в различной степени, составит более 50 млн. га, или почти 20% всех орошаемых массивов. При этом общий ущерб от потерь урожая на засоленных землях составит 10 млрд. долларов в год!

Однако это далеко не все. Сельскохозяйственные культуры на засоленных землях имеют значительно худшее качество продукции: хлопок по выходу линта и качеству волокна, арбузы и свекла по сахаристости, виноград по сахаристости и качеству вина. Кроме того, засоленные земли требуют значительно больших затрат воды, чем незасоленные. На большинстве же речных бассейнов мира в аридных и полуаридных зонах складывается дефицит воды, резко снижающий оросительную способность рек. Наконец, огромный ущерб, и экономический, и социальный, наносит человечеству полное выпадение из сельскохозяйственного оборота засоленных земель, которое приводит к прекращению всей сельскохозяйственной деятельности в огромных районах, вызывает потерю средств к существованию и необходимость перемены места жительства тысяч людей.

Борьба с засолением земель имеет важное значение не только для староорошаемых массивов, но и для вновь осваиваемых.

В настоящее время плодородные незасоленные земли, пригодные для орошения, в большей части стран уже освоены, а планируемые под мелиоративную подготовку либо располагаются на высоких отметках с большими уклонами, либо подвержены засолению. В СССР, например, подвержены засолению при орошении почти все земли, осваиваемые в Поволжье, площадью 2 млн. га, за исключением южных черноземов волжских террас. Освоение засоленных земель происходит довольно сложно

и требует длительного времени. Так, в Голодной степи на сильнозасоленных землях темпы роста урожайности в 3 раза меньше, чем на незасоленных, а хозяйство становится рентабельным через 8—9 лет вместо 2—3. Аналогичные данные имеются и в Индии.

Происхождение засоления и классификация соленакопления

География распространения засоленных земель чрезвычайно обширна. По данным В. А. Ковды, общая площадь подверженных засолению и солонцеватости земель мира насчитывает 545 млн. га. Страны, страдающие от засоления, располагаются в самых различных климатических условиях — от влажных (Канада и др.) до резко засушливых (Иран, Ирак и др.). Для всех них характерно превышение испарения над осадками либо в целом по году, либо в отдельные сезоны. Наибольшее распространение засоление земель получило в аридных и полуаридных зонах. В таких странах, как Иран, Турция, Ирак, Пакистан, засоленные земли составляют 50% и более общей площади орошения, а в Индии, США, СССР, Сирии, АРЕ, Австралии засолению подвержено 20—30% орошаемых территорий.

Наличие солончаковых почв отмечается в лесостепях Восточной и Западной Сибири (Е. С. Хильс, В. В. Егоров), на высокогорных плато Мексики, Венгрии (И. Сабольч), Югославии (М. Морелли), Румынии (Г. Обрияну), где количество осадков резко превалирует над испаряемостью. Распространение засоленных земель находится в тесной связи с источниками их происхождения. В. А. Ковда приводит следующие циклы и типы соленакопления.

Континентальные, обязанные своим происхождением процессам разрушения горных пород, выделению, движению, перераспределению и накоплению солей (углекислых, сернокислых и хлористых) во внутриматериковых бессточных областях. Внутри этого типа выделяются первичные подтипы основанные на аккумуляции в воде и почвах продуктов выветривания, и вторичные, вызванные их перераспределением.

Приморские, образующиеся в связи с влиянием морских вод и аккумуляции солей, главным образом хлоридов натрия, в прибрежноморских низменностях (Япония, Австралия, Нидерланды, Франция и др.).

Дельтовые, возникшие вследствие сочетания процессов приноса солей поверхностными и грунтовыми водами и их взаимодействия в древних дельтах рек (Амударья, Тигр, Хуанхе, Нил и др.).

Субартезианские, обусловленные испарением напорных подземных вод, выклинивающихся на поверхность или отлагающихся в слоях, близких к ней (территория, прилегающая к Каспийскому морю, плато Устюрт, верховья р. Колорадо и др.).

Антропогенные, вызванные неправильными методами воздействия человека на природу, вследствие чего возникают резкие изменения в природной среде, приводящие к аккумуляции или перераспределению солей (подъем уровня грунтовых вод при орошении, применение минерализованных вод на орошение и др.).

М. М. Эль-Габали называет четыре вида засоления почв в зависимости от происхождения: прибрежное, поверхностное, вызванное грунтовыми водами (артезианское), и вторичное.

Наибольшее распространение в мире получило вторичное засоление земель под действием орошения. Гибель цивилизаций Месопотамии вследствие засоления при орошении, многочисленные примеры других неудач и в Центральной Азии, и в Египте, и в Индии заставили выработать определенную практику для борьбы с засолением. Орошение древних оазисов в Туркестане, Индии успешно развивалось либо на естественно дренированных землях, либо за счет «сухого дренажа».

Большинство специалистов-мелиораторов считают, что уровень грунтовых вод и их минерализация на орошаемой территории повышаются вследствие потерь из оросительных каналов и потерь на полях. Темпы подъема уровня грунтовых вод зависят от разных условий, достигая 2—3 м в год, особенно для неинженерных систем.

При достижении критического уровня (2,5—3 м) происходит ряд серьезных изменений на орошаемых территориях: уменьшается их плодородие, затрудняется обработка почвы машинами, происходит осадка и разрушение зданий.

Для борьбы с таким засолением предлагается обычно строгое водопользование, повышение к. п. д. систем до 0,8—0,9 с помощью облицовок, отключение каналов в невегетационный период, создание интенсивных лесопосадок. Считается, что на слабодренированных землях эти

меры предотвратят засоление, а на недренированных — задержат его на 20—50 лет.

Наблюдение В. А. Духовного за динамикой уровня грунтовых вод в новой зоне орошения Голодной степи, исследования САНИИРИ в Каршинской степи показывают, что строительство систем на высоком инженерном уровне с к. п. д. 0,78—0,82 и с совершенной техникой полива с применением поливных трубопроводов не предотвращает подъем грунтовых вод. За 7—12 лет они поднимаются с глубины 15—20 до 3,5—4 м вследствие повышенной вертикальной проницаемости лессовидных суглинков и прекращения испарения через зону аэрации из глубоких грунтовых вод. Об этом свидетельствует тот факт, что подъем грунтовых вод при отсутствии естественной дренированности происходит еще до смыкания их с поверхностными.

Усиление подъема грунтовых вод отмечается и под влиянием строительства и наполнения водохранилищ (Асуанское).

Основными факторами, способствующими развитию засоления в почве, являются:

отсутствие или недостаток дренированности;

поступление солей с оросительной водой;

превышение испарения из грунтовых вод и напорного питания почвогрунтов зоны аэрации над осадками и подачей поливной воды.

Действительно, если отток влаги из почвы в грунтовые воды недостаточен, то есть естественная дренированность слаба или ограничена, происходит соленакопление, которое тем больше, чем больше минерализация грунтовых вод и интенсивность испарения. В случае, когда грунтовые минерализованные воды имеют напорное питание, почвы интенсивно засоляются, если не создан дополнительный дренажный отток.

Важнейший фактор в соленакоплении — дренированность. Известно, что вследствие недостаточной дренированности и постоянного поступления солей с грунтовой и оросительной водой интенсивному засолению подвергались еще до нашей эры земли в междуречье Тигра и Ефрата в Месопотамии.

Американские ученые установили, что в XIV в. до н. э. по такой же причине были выведены из сельскохозяйственного оборота и заброшены земли в долине р. Соленой в штате Аризона.

При орошении минерализованными водами в условиях слабодренируемых земель наблюдается увеличение минерализации грунтовых вод. Так, в районе Бени-Амир в Марокко с 1947 по 1968 г. содержание хлоридов выросло с 0,05—0,873 г/л до 0,211—6,462 г/л. Аналогичные факты имеют место в Израиле.

Особый вид соленакопления представляет собой накопление в почве солей натрия. По данным В. А. Ковды, солонцеватость распространена шире, чем само засоление. Причинами ее могут быть:

преобладание солей натрия в оросительной воде, несбалансированное с ионами кальция;

гидролиз натриево-алюмосиликатов в процессе выветривания горных пород;

промывка при отсутствии в почве достаточного количества дивалентных катионов;

уменьшение азота и сульфатов в анаэробных условиях (М. М. Эль-Габали);

подсос солей из слабоминерализованных грунтовых вод;

испарение воды, содержащей малые количества Na.

В отличие от вторичного засоления процесс осолонцевания идет очень длительно, но и борьба с этим процессом также намного сложнее.

Сейчас верхний горизонт большинства аридных почв богат гипсом, поэтому опасность осолонцевания таких почв ничтожна. Но в аридной зоне имеются малозагипсованные почвы, такие как темно-каштановые, часть сероземов, применение щелочных вод на которых неизбежно приведет к их осолонцеванию. Предотвращение этого явления может быть достигнуто добавкой гипса и органических удобрений. Часто орошаемые земли имеют гипсовую подошву на глубине 30—50 см, гипс в которой может быть мобилизован с помощью глубокого рыхления (В. А. Ковда).

Следует отметить особую опасность содового засоления для степных и лесостепных зон в СССР, особенно Поволжья, в связи с естественным количеством воды, влиянием биохимических процессов и мелководий на водохранилищах. Для аридной зоны в результате интенсивного дренирования земель возникает опасность вымыва гипса из активной толщи и подтяжки солей натрия из глубоких горизонтов. Одновременно с уменьшением гипса в почвах уменьшается и его содержание в оросительной

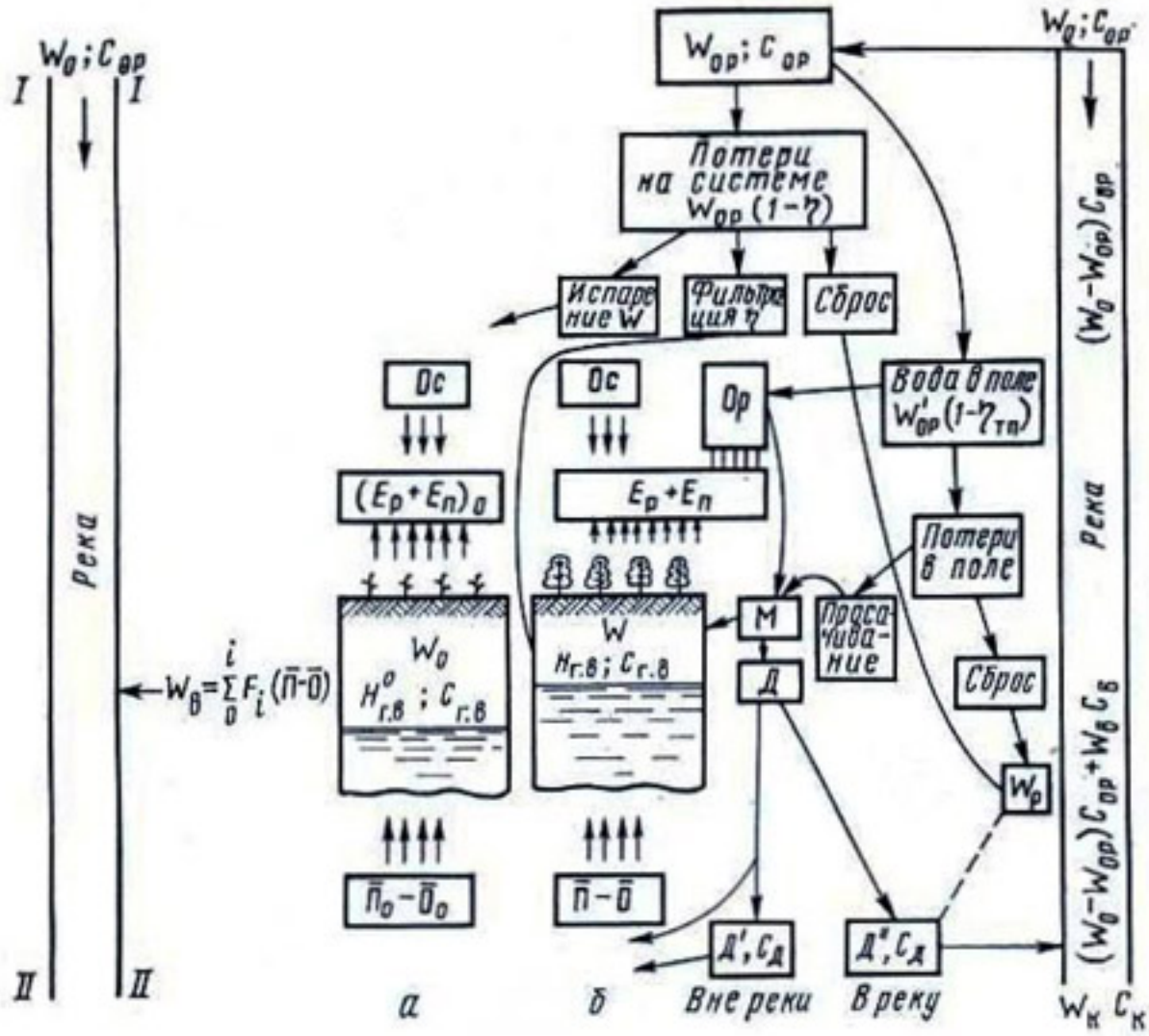


Рис. 4. Схема взаимодействия естественных и оросительных вод на орошаемом массиве:
а — до орошения; *б* — после орошения.

воде и тем самым еще более усиливается опасность осолонцевания почв.

Засоление и солонцеватость могут развиваться в условиях недостаточной дренированности под действием одного из указанных выше факторов или при их взаимодействии.

Процессы соленакопления в почвогрунтах орошаемых земель тесно связаны с взаимодействием происходящих здесь почвенных, гидрогеологических, гидрологических и физико-химических процессов.

Для большей наглядности представим схему взаимодействия воды, почвогрунтов и солей в пределах массива орошения и источника воды для двух стадий: до орошения и после него (рис. 4).

В естественном состоянии водный баланс территории характеризуется определенными климатическими условиями: осадки Ос, испарение и транспирация дикорасту-

щей или богарной растительностью $(E_р+E_п)_0$, почвенными запасами влаги W_0, зависящими от уровня грунтовых вод $H^0_{г.в}$, и сочетания в годовом цикле осадков и эвапотранспирации; гидрологическими (приток — отток): морских, селевых, паводковых, самоизливающихся или других поверхностных естественных вод $(\underline{П} - \underline{О})$; гидрогеологическими: наличие напорности или отточности подземных (грунтовых) вод $(\overline{П}—\overline{О})$. Если естественная дренированность территории достаточная, то $\underline{П_0}<\underline{О_0}$, если недостаточная, $\underline{П_0}>\underline{О_0}$.

В последнем случае грунтовые воды поднимаются, как правило, до тех пор, пока не начнут компенсироваться испарением.

Учитывая, что перенос солей осуществляется в основном элементами водного питания, важно иметь в виду минерализацию грунтовых (подземных), поверхностных (приток и отток) вод, а также исходную минерализацию почвенных растворов соответственно $C_{г.в}$; $C_п$; $C_о$; C_w.

Элементы водного питания в условиях орошения показаны на рисунке 4, *б*, где видно, что подаваемая оросительная вода Ор затрачивается на следующее:

покрытие совместно с другими приходными статьями баланса (осадки, питание из грунтовых вод, запасы влаги в почве) и испарения и транспирации $(E_р+E_п)$;

изменение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации;

создание промывных токов в поле (М);

инфильтрацию большей части потерь в поле и из оросительных каналов в глубь зоны аэрации вплоть до грунтовых вод, под влиянием чего формируется новое взаимоотношение $(\underline{П} - \underline{О})$;

испарение с поверхности воды в каналах;

сбросы с поля и каналов.

Дренированность при этом будет достаточной, если сохраняется условие:

$$\alpha М - (E_р + E_п)_{г.в} - (\underline{П} - \underline{О}) \leqslant 0,$$

где α — коэффициент, показывающий, какая доля промывной составляющей оросительных норм достигает грунтовых вод за минусом растекания и изменения влажности промывной зоны. Обычно α равен 0,8—0,95, иначе говоря, приток воды в грунтовые воды с промывной долей за минусом испарения и транспирации из грунтовых вод с учетом изменения подземного притока (оттока) не должен увеличивать уровень грунтовых вод.

Если же указанное выражение больше нуля, то это означает, что естественной дренированности недостаточно и ее необходимо усиливать искусственным дренажем.

Определение видов дренажа в зависимости от природных условий

Чтобы выяснить, в каких природных условиях возникает потребность в дополнительном дренировании и где в основном необходим горизонтальный дренаж, воспользуемся классификацией орошаемых территорий по гидрогеологическим условиям, разработанной Д. М. Кацем (табл. 1).

Эта классификация учитывает различия в геоморфологических условиях, строении пласта, коэффициентах фильтрации, напорности и минерализации грунтовых и подземных вод и почвенные условия.

Достаточно дренированные земли горных склонов, расчлененных предгорных долин и верхних частей конусов выноса не подвержены ни засолению, ни заболачиванию. Имеются, правда, отдельные, очень редкие, случаи континентального первичного и вторичного соленакопления до отметок выше 2 тыс. м над уровнем моря, например, в Таджикистане на склонах Гиссарского хребта, в Киргизии на Алайском хребте и др. В этих случаях они легко промываются на фоне глубокого горизонтального или вертикального дренажа, для которого здесь есть обычно оптимальные условия.

Горизонтальный неглубокий (1,5—2 м) дренаж требуется в качестве меры борьбы с заболачиванием большинства низких речных террас горного пояса. Примером могут служить долины Шахрихансая в Андижанской области, Акбуры в Киргизии и др. Дренирование подгорных равнин везде, кроме вершин и высоких террас, обычно осуществляется довольно интенсивно, однако различными типами дренажа. В зоне выклинивания, характеризующейся в основном гравийно-мелкоземистыми отложениями, широко распространено заболачивание. Здесь необходимо снизить грунтовые воды до 1,5—2 м от поверхности, что успешно достигается вертикальными скважинами при линейном размещении их либо относительно неглубоким систематическим горизонтальным дренажем (конус выноса Ходжи-Бакиргана в северном Таджикистане и др.). На низких с таким же характером почвогрунтов речных

террасах, как в долине р. Карадарья, ниже Кампырравата, требуется только неглубокий горизонтальный закрытый дренаж (рис. 5).

Наиболее трудный объект мелиорации — периферия конусов выноса, характеризующаяся интенсивным засолением почвогрунтов, напорностью грунтовых вод, распространением труднопроницаемых гипсовых прослоек, резко переслаивающимися песчано-суглинистыми отложениями, в которых эти прослойки залегают большими напорными линзами либо мелкими замкнутыми прослойками легких грунтов. В первом случае следует применять вертикальный дренаж, во втором — глубокий горизонтальный. Примерами может служить периферия конусов выноса многочисленных саев, спускающихся с Туркестанского хребта в Голодную степь. Здесь, на территории, прилегающей с юга к трассе Южного Голодностепского канала (ЮГК), в районе между г. Янгиером и ст. Обручево, литологическое строение толщи покровных отложений представлено до глубины 22—36 м суглинистыми и супесчаными отложениями с коэффициентами фильтрации 0,3÷1,2 м/сут, а ниже — мощными водоносными горизонтами на глубинах 25—36 и 50—60 м с коэффициентами фильтрации более 20 м/сут. Нижние горизонты имеют напорность, которая создает исходное высокое положение грунтовых минерализованных (15—32 г/л) вод на глубине 3,5÷5 м и высокое засоление почвогрунтов. Такая же литология языками вдается и на территорию севернее ЮГК, в районе совхозов № 3 и № 4. Далее же водоносные прослойки углубляются, переслаиваются, превращаются в отдельные, не связанные между собой или слабо фильтрующие линзы. Эта часть периферии конуса выноса характеризуется очень высокой минерализацией грунтовых вод вплоть до рассолов (60 г/л) в связи с их застойностью и засолением на большую глубину толщи покровных отложений с образованием пухлых солончаков с подстилающими непроницаемыми прослойками гипсовых отложений. Здесь мелиорацию земель пришлось осуществлять на фоне очень густого (80—130 м/га) горизонтального закрытого дренажа глубиной 3 м с усилением его на период промывок временным дренажем глубиной 1 м с нормами капитальных промывок до 40 тыс. м³/га (нетто). Первые же земли мелиорированы вертикальным дренажем с густотой 1 скважина на 100—150 га и нормами капитальных промывок 10÷20 тыс м³/га. Аналогичные

Таблица 1. **Типы гидрогеологических условий орошаемых районов** (по Д. М. Кацу) **и выбор типов дренажа**

Тип	Гидрогеологические условия	Геоморфологический тип	K, м/сут	Толщина покровного слоя, м	Наличие минерализации грунтовых вод	Наличие напорности	Наличие засоления	Дренаж
А	Интенсивно дренированные земли при однослойном строении пласта	Горные склоны, расчлененные предгорные долины, верхние глубоко расчлененные аллювиальные террасы, верхние привершинные части конусов выноса	>1		—	—	—	—
Б	Дренированные земли, двухслойная среда	Аллювиальные галечниковые террасы	>0,5 / >2	3—4	—		—	—
В	Слабодренированные земли	Верхние субаэральные дельты	0,1—0,5 / >2	<4—5	—	—	—	Комбинированный
Г	Дренированные земли с двухслойной схемой строения пласта	Несовершенные конусы выноса, межадырные впадины	0,5—1 / >3—5	<8—10	—	+	—	Вертикальный
Д	Слабодренированные земли при двухслойном строении пласта	Нижние и средние аллювиальные террасы в межгорных впадинах и на платформенных равнинах	0,5—1 / 3—5	8—10	+	—	+	Горизонтальный Комбинированный

Е	Слабодренированные земли при двухслойном строении пласта	Субаэральные дельты рек на платформах и широкие аллювиальные террасы	0,1—0,5 / 2—5	10—20	—	±	±	Вертикальный
Ж	То же, при многослойном строении пласта	Зона выклинивания грунтовых вод	0,1—0,7 / >2	15—20	±	+	+	Вертикальный Горизонтальный
З	Бессточные земли при двухслойном строении	Древние и современные аллювиальные дельты	0,1—0,5 / >1	<5—7	+	—	±	Комбинированный
И	Бессточные земли при однослойном строении	Водораздельные массивы на платформах, широкие аллювиальные террасы	0,1—0,5		+	Слабая	+	Горизонтальный
К	Бессточные земли в сложных геохимических условиях	Дельты рек в межгорных низменностях	>0,5		+	+	+	Горизонтальный
Л	Бессточные земли при однослойном строении	Денудационно-аккумулятивные равнины, предгорные аллювиальные равнины	<0,1		+	—	+	Горизонтальный
М	Бессточные земли при двухслойном строении пласта	Зоны выклинивания, районы со сложными геохимическими условиями	0,1—0,5 / <1—2	>10—20	+	±	+	Вертикальный
Н	То же, при многослойном строении пласта							Горизонтальный

(+) — отмечается наличие минерализации или напорности;
(—) — отсутствие минерализации или напорности.

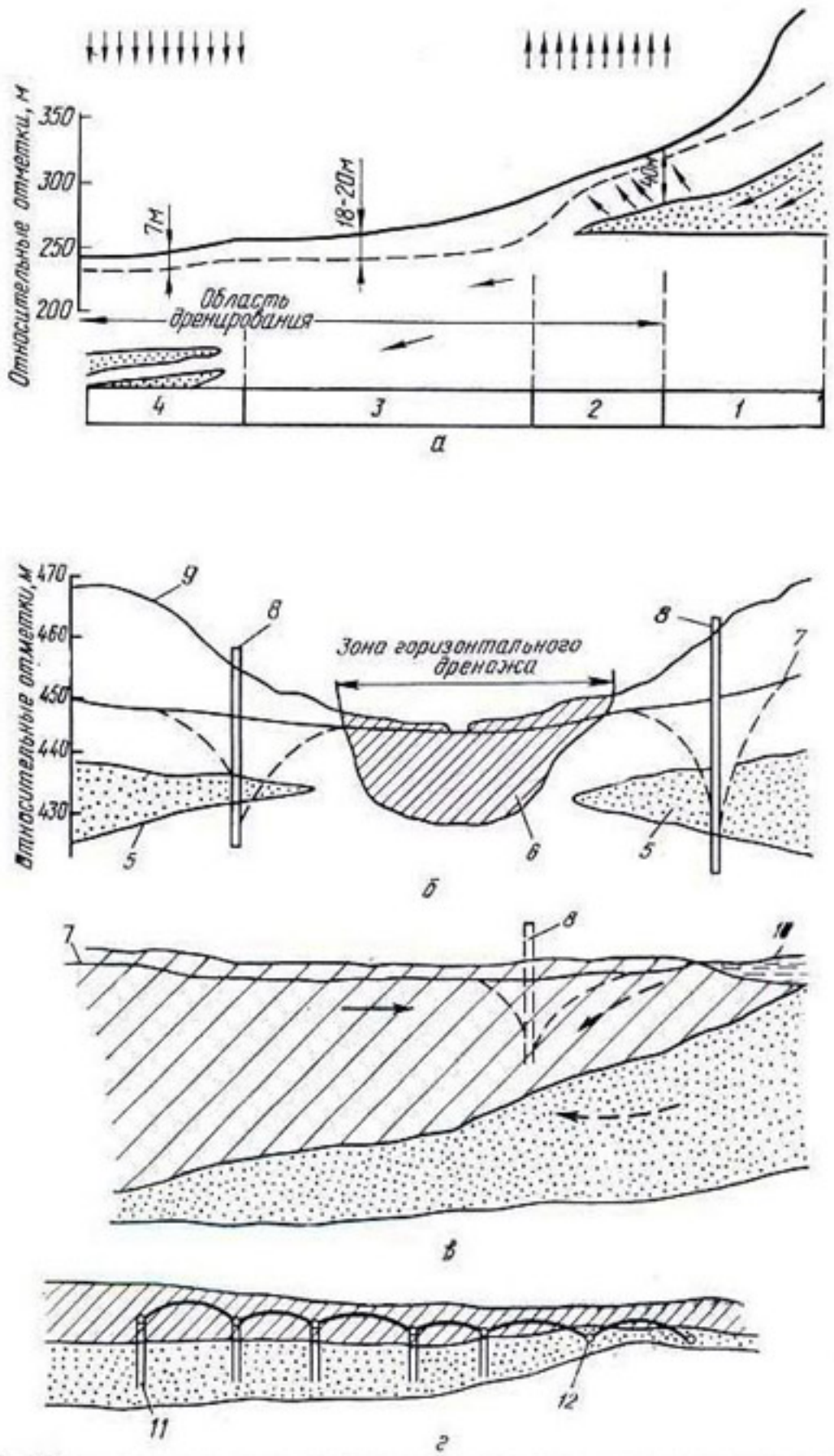


Рис. 5. Характерные гидрогеологические зоны применения дренажа:

а — подгорная долина; *б* — волнистая долина; *в* — приморская дельта; *г* — слоистая дельта; *1* — зона погружения грунтовых вод; *2* — зона разгрузки напорных вод выклинивания; *3* — область транзита; *4* — область слабого оттока; *5* — песчаные прослойки K=5—20 м/сут; *6* — луговые илистые отложения K=0,05—0,2 м/сут; *7* — уровень грунтовых вод; *8* — скважина вертикального дренажа; *9* — суглинки и супеси K=0,3—1 м/сут; *10* — уровень моря; *11* — дрены с усилителями; *12* — дрены горизонтальные в подстилающем слое.

примеры могут быть приведены и по территории периферии конусов выноса рек Сох, Исфара в западной части Ферганской долины и по другим территориям.

Особое место занимают волнистые плато подгорных долин. Обычно они естественно хорошо дренированы, однако зачастую в пониженных местах — логах — требуют дренажа, вертикального или горизонтального, как западная часть Ломакинского волнистого плато в Джизакской степи, в районе колхоза им. Ф. Энгельса. Здесь пришлось заложить в тяжелых межхолмистых понижениях горизонтальный дренаж интенсивностью 40—60 м/га. Кроме того, для обеспечения оттока с холмов при орошении у подножий их был устроен ряд скважин вертикального дренажа. Если бы проницаемость почвогрунтов в верхних отложениях лога была достаточной, можно было бы обойтись только вертикальным дренажем в логах или, наоборот, усилить горизонтальный дренаж там с учетом приема дополнительного притока со всей территории.

Формирование приморских дельт происходит обычно в результате вековых отложений наносов. При этом по мере удаления от устья их механический состав утяжеляется. Если в формировании дельт участвуют еще и приливно-отливные явления, это придает литологическому сложению характер слоистости, причем тяжелые по механическому составу наносы лежат на хорошо водопроницаемых гравийно-песчаных материалах. Примером может служить развитая дельта Куры, наносы которой покоятся на песчаных отложениях Каспийского моря. В том случае, если берега сложены глинистыми породами или не перерабатываются, дельта зачастую формируется на большую глубину из тяжелых наносных отложений с очень малыми коэффициентами фильтрации, как в низовьях Амударьи, на территории Каракалпакской АССР. Здесь, так же как и при формировании дельты с участием моря, целесообразно применение горизонтального дренажа. В условиях приморских дельт, несмотря на слоистость, нет смысла делать вертикальный или комбинированный дренаж, чтобы не вовлекать в сферу солеоборота инфильтрующиеся морские минерализованные глубинные воды. Приморские дельты зачастую располагаются на очень низких отметках, поэтому дренаж здесь требует строительства системы перекачечных станций. Так, прибрежная дельта Нила в Египте имеет отметку от 0 до 4 м над уровнем моря, а иногда и ниже. Площадь 817 тыс. га

дренированных земель здесь обслуживается 24 крупными дренажными насосными станциями. Объем дренажного стока составляет в среднем 17 тыс. м³/га и равен 78% оросительной водоподачи.

В то же время по мере продвижения вверх по течению рек крупность отлагаемых наносов увеличивается и развивается слоистость, особенно если дельта накладывается на песчаные пустыни, как в низовьях Амударьи в пределах Хорезмского и Ташаузского оазисов. Применение здесь вертикального дренажа нецелесообразно, так как скважины обычно имеют маленькие удельные дебиты и небольшую площадную нагрузку, что делает их неэкономичными. Здесь очень экономичным становится горизонтальный дренаж, если он может прорезать покровные отложения, или дренаж комбинированный с усилителями до песчаной толщи. Аналогичное положение складывается и в сухих дельтах, например дельте Теджена, где наиболее целесообразно применять горизонтальный либо комбинированный дренаж.

Дренаж аллювиальных равнин может быть любого типа. Выбор типа должен основываться на технико-экономических показателях так же, как и в условиях высоких речных долин, пустынных низменностей, где искусственный дренаж требуется только при усилении естественного. Можно выделить наряду с приморскими дельтами и приморские низменные равнины, которые формируются под влиянием только интрузивных процессов моря без участия речных наносов. Для освоения этих земель необходимы постоянный горизонтальный дренаж, интенсивный временный дренаж и комплекс агротехнических мелиоративных мероприятий.

Подводя итог сделанному анализу, можно отметить, что горизонтальный закрытый дренаж для борьбы с засолением и заболачиванием орошаемых земель является в настоящее время и будет в перспективе достаточно широкоприменяемым методом для создания надежного фона при мелиорации орошаемых земель.

Развитие горизонтального закрытого дренажа в нашей стране и его эффективность

Широкое производственное внедрение в нашей стране система закрытого горизонтального дренажа получила в новой зоне Голодной степи после 1958 г. Этому способ-

ствовали как обширные научно-исследовательские работы ВНИИГиМ, САНИИРИ и МГМИ, так и большие производственные исследования, поиски и разработки, проведенные Голодностепстроем, Главсредазирсовхозстроем, Средазгипроводхлопком и ГСКБ по ирригации (А. А. Саркисов, Е. И. Озерский, Э. М. Беньяминович, Д. К. Терситский, Л. Л. Дюндин, В. М. Весманов и др.). Здесь за короткий период были созданы траншейная, бестраншейная, полумеханизированная и щелевая технологии дренажа, решены вопросы конструкции труб и фильтра, мелиоративной их эффективности и много других расчетных, технологических и эксплуатационных задач.

Новая зона Голодной степи (Духовный, 1973) расположена в основном на территории слабодренированной и бессточной широкой аллювиальной долины Сырдарьи и частично на территории конусов выноса Туркестанского хребта. Грунтовые воды сильноминерализованные (60 г/л), частично напорные. Коэффициенты фильтрации на большей части территории менее 0,5 м/сут.

Первоначальными проектами был предусмотрен разреженный горизонтальный дренаж с интенсивностью 10—18 м/га. Первые же годы освоения показали его недостаточность и потребовали резкого усиления темпов дренажных работ. В 1960 г. было построено всего 100 км дренажа, в 1964 г. — более 300, а в 1966 г. — уже 1600 км дренажа. В последующем темпы ввода дренажа достигали 2000 км в год. К настоящему времени построено более 15 тыс. км горизонтального дренажа на площади более 240 тыс. га. В результате дренаж стал основным фактором, обеспечивающим динамику уровней и минерализации грунтовых вод, а также гарантирующим постоянное снижение степени засоления поливных земель. Ежегодно с орошаемой территории отводится дренажными водами 2300 м^3/га и более 1 млн. т солей, что в пересчете на 1 га земель с уровнем грунтовых вод выше отметки дренажа составляет 13,7 т. Сильно- и среднезасоленные земли уменьшились с 1964 по 1975 г. на 49 тыс. га.

По опыту Голодной степи с 1963 г. начинается укладка закрытого дренажа в Каршинской и Сурханшерабадской степях, в зоне Каракумского канала и Яван-Обикикской долине.

Каршинская степь расположена на отложениях субаэральной дельты р. Кашкадарьи с резко переслаивающейся геоморфологической структурой. Темпы строитель-

ства дренажа составляют 500—600 км в год. Условия и результаты работ по дренажу аналогичны Голодной степи.

В зоне Каракумского канала дренаж строится с 1964 г. в Марыйском и Тедженском оазисах. Здесь коэффициенты фильтрации колеблются от 0,3 до 1,3 м/сут. Темпы укладки дренажа здесь соответственно 40 и 50 км в год. Дренаж, построенный методом «полки», в Марыйском оазисе в условиях слабодренированной двухслойной среды с коэффициентами фильтрации соответственно 0,5 и 2 м/сут работает устойчиво, а построенный дреноукладчиками в Тедженском районе, по данным Туркменниигим, заилен (более 50%).

В Туркмении нет сплошных массивов закрытого дренажа, имеются только одиночные участки, разбросанные в различных хозяйствах.

В Яванской межгорной впадине дренаж построен в толще лессовидных суглинков с $K_ф > 0{,}1$ м/сут при интенсивном напорном питании грунтовых вод.

Необходимое снижение уровня грунтовых вод на фоне такого дренажа не было достигнуто на всей площади. Поэтому на отдельных массивах заложили дополнительный дренаж глубиной 1,5 м с интенсивностью 300—400 м/га. Под влиянием промывок и этого дренажа в целом баланс солей сложился отрицательно.

Большое развитие дренаж получил в Азербайджане, где усилиями АзНИИГиМ и Главазмелиоводстроя под руководством П. А. Полад-заде, А. К. Бехбудова много сделано по созданию надежного дренажного фона на орошаемых массивах Муганской, Сальянской и Ширванской степей. Это резко улучшило мелиоративное состояние земель, превратило Азербайджан в одну из крупнейших хлопководческих республик страны.

До строительства дренажа здесь 90% площадей составляли средне- и сильнозасоленные земли. За 20 лет строительства коллекторно-дренажной сети, по данным А. П. Ахмедова (табл. 2), резко вырос дренажный сток и вынос солей с одного гектара. Площадь сильно- и среднезасоленных земель уменьшилась в 4 раза, а солончаков — в 23 раза. Урожайность хлопчатника с 10 ц/га в 1950 г. выросла до 23—27 ц/га в 1974 г. Следует отметить, что благодаря значительно большим коэффициентам фильтрации, чем на среднеазиатских системах, и вследствие напорного питания грунтовых вод удельные

Таблица 2. Сравнительные показатели коллекторно-дренажных систем Мугано-Сальянского массива

Показатели	Муганская степь		Сальянская степь	
	1954 г.	1973 г.	1954 г.	1973 г.
Дренированная площадь, тыс. га	82,0	90,0	30,3	35,0
Общая длина дренажной сети, км	1500	2773	823	1200
Удельная протяженность дренажа, м/га	18,4	30,8	27,1	34,2
Годовой сток, млн. м³	122,3	604,2	47,6	207,4
Среднегодовой объем отведенных дренажных вод, м³/га	1490	6704	1560	5925
Среднегодовой дренажный модуль, л/с.га	0,05	0,21	0,05	0,19
Среднегодовая минерализация дренажных вод, г/л	26,50	14,20	38,50	16,40
Количество солей, вынесенных дренажными водами с 1 га, т	39,6	95,0	60,7	94,5
Общий объем вынесенных солей с дренажными водами, тыс. т	3160	8050	1840	3310

показатели отвода солей и дренажного стока здесь более высокие (в среднем в 1,6—2 раза).

Оригинальное направление по строительству горизонтального дренажа с применением полимерных фильтров на новых землях Краснознаменской и Северокрымской оросительных систем, а также на других орошаемых землях юга Украины создано благодаря работам Минводхоза УССР (В. Н. Ткач) совместно с УкрНИИГиМ (В. П. Насиковский, И. В. Кононов), Институтом гидромеханики АН УССР (А. Я. Олейник, Н. Г. Пивовар). Это позволило на указанных массивах ежегодно строить 350—500 км дренажа.

Дренируемые массивы здесь расположены в условиях субаэральных отложений с наличием подовых понижений с тяжелопроницаемыми суглинками и глинами. Грунтовые воды сильно минерализованы. При средней глубине дренажа 3 м и орошении дождеванием нормой 3,5 тыс. м³/га глубина грунтовых вод в междренье поддерживается на уровне 1,6—1,8 м при отрицательном солевом балансе. Междренные расстояния в Крыму со-

ставляют 220—260 м, а на Краснознаменской системе — 300—320 м.

Объем работ по горизонтальному дренажу орошаемых земель, выполненных в СССР, и эффективность его работы характеризуют данные таблицы 3.

Таблица 3. **Показатели закрытого дренажа орошаемых земель СССР** (по состоянию на 1 января 1978 г.)

Регионы	Дренажная площадь, тыс. га	Общее количество дренажа, тыс. км	Удельная протяженность, м/га	Дренажный модуль, л/с · га	Глубина дренажа, м	Тип дренажа
Новая зона Голодной степи	246,2	15,6	63,5	0,10	2,8—3,1	Трубчатый с песчаным фильтром
Каршинская степь	47,2	3,3	28,0	0,12	2,8—3,1	То же
Сурханшерабадская степь	100,9	4,92	37,4	0,165	3,35	» »
Зона Каракумского канала	12,2	0,62	51,0	0,11	2,0—2,5	» »
Мугано-Сальянский массив	125,0	4,0	32,0	0,20	2,3—2,8	» »
УССР	45	2,5	55,5	0,08	3,0	Трубчатый с фильтрами из базальтового волокна
Яван-Обикиикская долина	5,3	0,4	75,2	0,09	4,0	Трубчатый с гравийно - песчаным фильтром

Как видно из приведенных данных, на массивах с горизонтальным закрытым дренажем повсеместно создаются условия для устойчивого рассоления грунтов в зоне дренажа.

ГЛАВА 2

ВЛАГО- И СОЛЕПЕРЕНОС В ПОЧВОГРУНТАХ И ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕЛИОРАТИВНОГО РЕЖИМА НА ФОНЕ ДРЕНАЖА

В процессе освоения засоленных земель и в работе дренажа различают два периода: мелиоративный и эксплуатационный. Авторы же считают необходимым подразделить этот процесс на три периода (подробнее см. главу 7).

Мелиоративным периодом считается первый этап освоения (и соответственно начальный период работы дренажа) засоленных земель, при котором капитальными промывками большими нормами достигается опреснение верхней толщи (≈ 1 м) почв и их устойчивое рассоление. В эксплуатационный период создается такой промывной режим орошения, при котором превышение оросительной водоподачи над дефицитом увлажнения формирует промывную долю орошения в размерах, необходимых для предотвращения сезонного соленакопления и дальнейшего опреснения почвогрунтов при увеличении их плодородия.

Рассмотрим общий ход изменения влажности, миграций солей и взаимодействия почвенных и грунтовых вод на фоне горизонтального дренажа для эксплуатационного периода. При отсутствии искусственного увлажнения уровень грунтовых вод (УГВ) может устанавливаться ниже или выше дна дрены.

Изменения в интенсивности испарения и притока приводят к подъему (или опусканию) уровня грунтовых вод (УГВ) и капиллярного увлажнения (КУ) на величину

$$\mu \frac{dh}{dt} = \frac{d\,[(\text{П} - \text{О})] - E_{\text{УГВ}} - D]}{dt}, \qquad (1)$$

где μ — коэффициент гравитационной водоотдачи или недостаток насыщения пород, представляющий собой, по А. В. Лебедеву (1976), изменение влагозапасов за счет гравитационных вод, приходящееся на единицу изменения уровня грунтовых вод на единице площади.

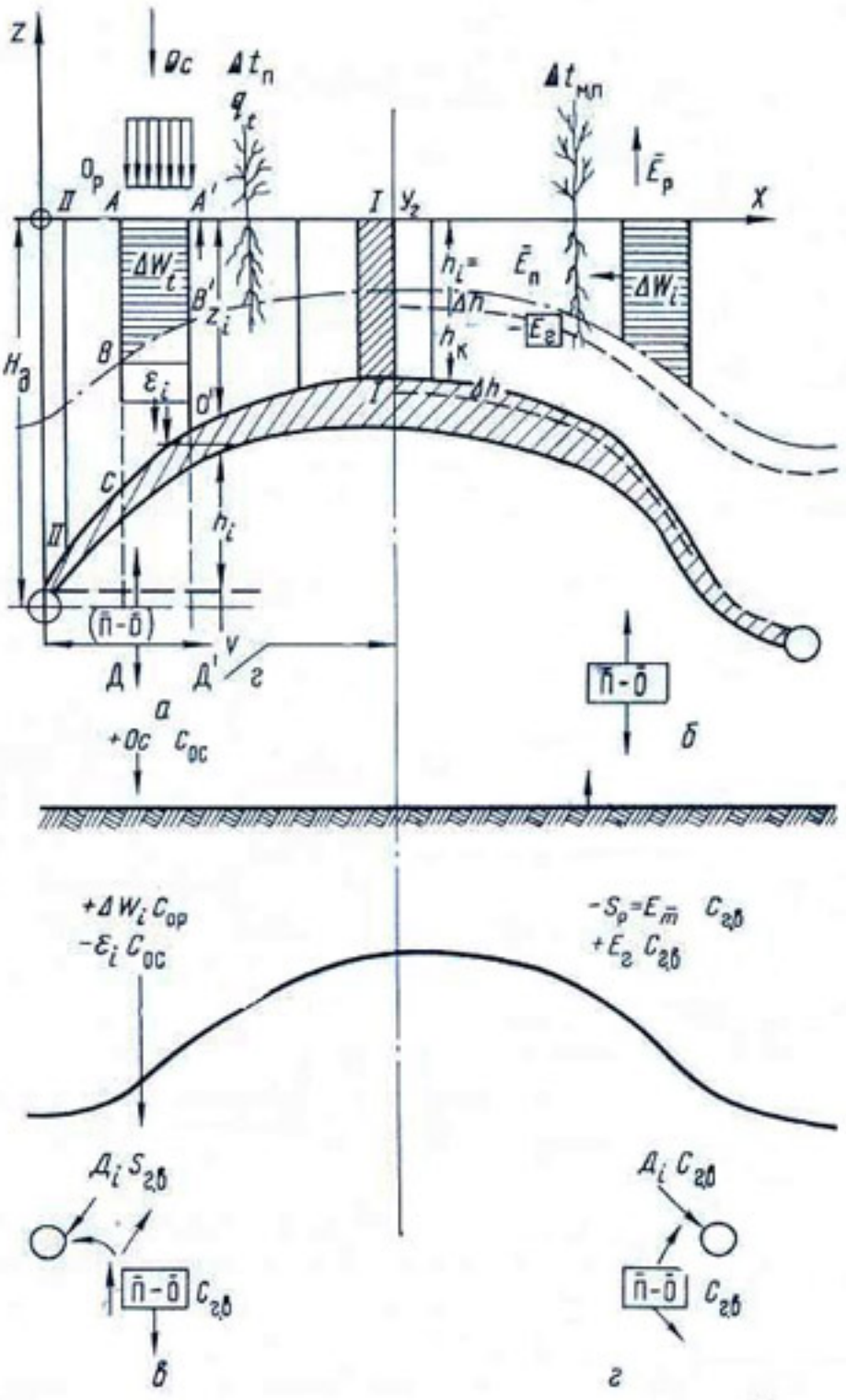


Рис. 6. Формирование положения грунтовых вод на фоне горизонтального дренажа:

а — в случае безнапорного питания при орошении; *б* — в случае безнапорного питания при испарении; *в* — в случае напорного питания при орошении; *г* — в случае напорного питания при испарении.

В условиях орошаемого земледелия (рис. 6) в каждую единицу времени почвогрунты зоны аэрации расходуют определенное количество своих запасов влаги ΔW_i на физическое испарение и транспирацию. Если растение корнями не достигает зоны капиллярного насыщения, то

все питание растений и испарение покрываются расходованием запасов влаги зоны аэрации. Для удовлетворения этой ежедневной потребности каждый элементарный участок должен был бы получать осадки или оросительную воду в размерах ежедневного расходования. Но потребность в такой подаче отпадает благодаря способности почв к резервированию запасов влаги, которая является характеристикой каждой почвы, определяемой ее водоудерживающей способностью, глубиной и массой проникновения корневой массы в различные периоды развития ее в течение вегетации. Это дает возможность увлажнять почву не постоянно, а периодически, при этом кратковременные периоды поливов сменяются периодами межполивными, когда расходуются созданные запасы влаги.

А. А. Роде, С. И. Долгов, А. В. Лебедев, Б. В. Дерягин установили, что различные формы влаги в почве характеризуют разные скорости ее перемещения:

в пределах несколько выше капиллярной влагоемкости гравитационная влага не удерживается капиллярными силами и при наличии достаточного дренажа срабатывается. Эта влага в почве должна в основном создавать дренажный сток (разница между максимальной влагоемкостью почв $\overline{W}_{\text{пв}}$ и капиллярной влагоемкостью $\overline{W}_{\text{кв}}$ или предельной полевой влагоемкостью $\overline{W}_{\text{ппв}}$);

в пределах от капиллярной влагоемкости до влажности завядания $\overline{W}_{\text{вз}}$ располагается доступная для растений влага, но ее доступность уменьшается по мере уменьшения влажности. Это уменьшение, по А. И. Будаговскому, подчиняется экспоненциальной зависимости.

Ниже $\overline{W}_{\text{вз}}$ располагается влага, мало- и почти недоступная растению, но на нее, как показали работы САНИИРИ на целине Каршинской степи, действует испарение.

Поверхность грунтовых вод представляет собой границу двух резко отличных по характеру зон: ниже уровня грунтовых вод — насыщенная зона и выше — ненасыщенная. В насыщенной зоне вся пористая среда заполнена жидкостью. В пористой среде, которая сама описывается осредненными параметрами, принято рассматривать осредненную картину движения жидкости. При этом исходят из невозможности исследования движения каждой отдельной частицы жидкости в пористой среде,

так как поры имеют неправильную форму и различные размеры.

Основная задача в области фильтрации — расчет скорости фильтрации, под которой понимают расход жидкости в единицу времени, отнесенный к единице площади поперечного движения потока:

$$v = \frac{Q}{S}, \tag{2}$$

где Q — расход; S — площадь полного сечения фильтрующего слоя.

Так как движение жидкости происходит только через просветы, то действительная, или истинная, скорость движения v^* подземных вод определится следующим соотношением:

$$v^* = \frac{Q}{S_1} = \frac{Q}{mS},$$

где S_1 — площадь просветов, через которые проходит расход; m — пористость.

Скорость фильтрации и истинная скорость движения подземных вод между собой связаны соотношением $v = mv^*$.

При экспериментальном изучении движения воды в пористой среде был установлен основной закон фильтрации — Дарси (или линейный закон фильтрации):

$$v = KI = -K\frac{dh}{dl}, \tag{3}$$

где I — градиент пьезометрического напора (пьезометрический уклон), представляющий собой падение напора $h = \frac{p}{\gamma} + z$ (скоростным напором в силу его малости пренебрегают) на единицу длины фильтра l; p — гидродинамическое давление; γ — средняя плотность воды; z — координата, в которой измеряется напор над плоскостью сравнения; K — коэффициент фильтрации, характеризующий одновременно как фильтрационные свойства пористой среды (грунта), так и физические свойства фильтрующей жидкости.

Закон Дарси имеет верхний и нижний предел применимости. Многочисленными исследованиями Н. П. Павловского, Г. К. Каменского, В. Н. Щелкачева, Н. Ф. Бондаренко и других установлено, что он справедлив при определенных числах Рейнольдса, колеблющихся от 1 до 12 (Мироненко, Шестаков, 1969). При больших числах Рейнольдса рекомендуется использовать двучленную

формулу Ф. Форхгеймера, иногда называемую законом Прони:

$$I = av + bv^2, \tag{4}$$

где a и b — некоторые константы.

При ламинарном режиме фильтрации квадратом скорости можно пренебречь. В этом случае формула (3) совпадает с формулой (4). При турбулентном режиме фильтрации скорости жидкости возрастают и пренебрежение членом bv^2 может привести к значительным погрешностям.

В очень слабопроницаемых породах фильтрационные токи возникают при определенных градиентах, превышающих так называемый начальный градиент фильтрации. Б. В. Дерягин, Н. Ф. Бондаренко, С. А. Роза установили, что этот градиент I_0 находится в зависимости от геометрии порового пространства и реологических свойств жидкости. Н. Ф. Бондаренко выявил, что в песках I_0 имеет порядок 10^{-3}, а в глинах до 1. Поэтому для связных грунтов при $I > 2I_0$ в ламинарных условиях закон Дарси принимает вид

$$v = K(I - nI_0), \tag{5}$$

где $n = \frac{2}{3} \div \frac{4}{3}$.

Для описываемых условий горизонтального дренажа в основном применяется линейный закон Дарси. Лишь, как указывают С. К. Абрамов, Б. М. Дегтярев и И. В. Корниенко (1976 г.), в прифильтровой зоне справедлива формула Прони.

При промывке и промывном режиме орошения в тяжелых суглинках и глинах надо учитывать начальный градиент фильтрации. В противном случае увеличится продолжительность промывок в тяжелых грунтах и запроектированного дренажа будет недостаточно для быстрого рассоления грунтов. В остальных случаях фильтрация может быть описана по линейному закону без начального градиента, но надо иметь в виду, что коэффициент фильтрации изменяется под действием гидродинамических сил, уплотнения, коагуляции, изменения концентрации, осмоса, электрического и магнитного полей.

Эти изменения (Бондаренко, 1975) следует учитывать только при коэффициентах фильтрации менее 0,12 м/сут, то есть в слабопроницаемых грунтах.

Одно из основных уравнений, характеризующих движение жидкости в насыщенной пористой среде,— уравнение неразрывности (сплошности), решения которого для различных граничных условий общеизвестны.

Многие проблемы, связанные с мелиорацией осушаемых и орошаемых массивов, приводят к необходимости рассматривать фильтрацию при неполном насыщении грунта. Объектом исследования при этом является зона аэрации — зона неполного насыщения, расположенная между грунтовыми водами и поверхностью земли. В отличие от области полного насыщения грунта, ограниченной свободной поверхностью грунтовых вод, жидкость в зоне аэрации занимает лишь часть порового пространства грунта. Передвижение влаги в зоне аэрации происходит под действием сил разной природы. Процесс влагопереноса в зоне аэрации намного сложнее, чем в зоне насыщения. Здесь наряду с гравитационным переносом активно участвует капиллярный перенос. Кроме того, движение влаги происходит и в виде пара.

Принимается, что основными среди факторов переноса служат гравитационные токи, обусловливаемые инфильтрацией осадков и оросительной воды, и капиллярные токи, вызываемые испарением и транспирацией. Существуют и молекулярные токи, обусловленные градиентами температур и влажности, но ими пренебрегают.

В жидкости возникают и диффузионные явления, выраженные диффузивностью D, как функцией влажности W. Причем коэффициент фильтрации K_W и эквивалентное давление $\psi_p = p/\gamma$ становятся также функцией влажности в пределах от полной влагоемкости $W_{пв}$ до влажности завядания $W_{вз}$:

$$K_W = K(W),$$

$$\psi_p = \psi(W),$$

$$D = D(W)$$

Функция $\psi_p = \psi/(W)$ имеет значительный гистерезис, объясняющийся изменением во внутрипоровых объемах в зависимости от направленности мениска — выпуклости или вогнутости, что определяется повышением или понижением влажности. В функциях же $K(W)$ и $D(W)$ гистерезиса почти нет.

Для $K(W)$ С. Ф. Аверьянов предложил зависимость

$$K = K_0\left(\frac{W - W_{вз}}{W_{пв} - W_{вз}}\right)^n,$$

где K_0 — коэффициент фильтрации насыщенной среды; $n=3{,}5$; Н. Н. Биндеман рекомендует принимать $n=3$, А. И. Будаговский — $n=4$.

По В. Гарднеру, эта зависимость имеет вид

$$K = K_0 e^{-\alpha(W - W_{вз})},$$

и аналогично для диффузивности

$$D = D_0 e^{\beta(W - W_{вз})},$$

где α и β — параметры, найденные для каждого вида грунта опытным порядком.

С учетом всего вышеизложенного при движении влаги в зоне аэрации скорость ее перемещения определяется аналогично закону Дарси при полном насыщении грунта

$$\vec{v} = -K \operatorname{grad} h, \tag{6}$$

где $h = \frac{p}{\gamma} + z = \psi_\beta + z$ — гидростатический напор, зависящий от влажности $K = K(W)$.

Следовательно, формулу (6) можно переписать в виде

$$\vec{v} = -K(W) \operatorname{grad} h. \tag{7}$$

По аналогии со сказанным выше для насыщенной зоны при обобщенном законе Дарси

$$\vec{v} = -K(W) \operatorname{grad}\left(\frac{p}{\gamma} + z\right)$$

получаем выражение для компонента скорости фильтрации

$$\left.\begin{aligned} v_x &= -K(W)\frac{\partial h_p}{\partial x};\\ v_y &= -K(W)\frac{\partial h_p}{\partial y};\\ v_z &= -K(W)\frac{\partial h_p}{\partial z} - K(W). \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Если ввести вместо напора h_p давление всасывания $\psi = h_p$ и воспользоваться соотношением

$$\frac{dh_p}{dl} = \frac{dh_p}{dW}\frac{dW}{dl}; \quad \frac{\partial h_p}{\partial W} = -\frac{\partial \psi}{\partial W},$$

то выражение (8) примет вид

$$\left.\begin{aligned} v_x &= -D(W)\frac{\partial W}{\partial x}; \\ v_y &= -D(W)\frac{\partial W}{\partial y}; \\ v_z &= -D(W)\frac{\partial W}{\partial z} - K(W), \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

где величина $D(W) = -K(W)\frac{\partial \psi}{\partial W}$.

Эти соотношения верны для изотропного грунта

$$K_x(W) = K_y(W) = K_z(W) = K(W)$$

при отсутствии капиллярного гистерезиса.

Подставляя формулу (9) в уравнение (7), получим уравнение влагопереноса:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[D(W)\frac{\partial W}{dy}\right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}[D(W) + K(W)] \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

или

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \operatorname{div}[D(W)\operatorname{grad} W] + \frac{\partial K(W)}{\partial z}.$$

Уравнение (10) — квазилинейное, параболического типа. Наиболее эффективное средство его решения — численное решение с использованием ЭВМ.

В случае вертикального влагопереноса оно принимает вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial z}\right] + \frac{\partial K(W)}{\partial z}. \qquad (11)$$

Данным выражением можно пользоваться в ненасыщенной зоне, когда колебания температуры незначитель-

ны и когда градиент концентрации растворенных веществ по высоте слоя невелик. Эксперименты показывают, что оно не универсально, например, когда влага перемещается из более глубоких горизонтов к поверхности испарения, проходя зону с большей влажностью (из зоны с меньшей влажностью). Для учета этого явления уравнение (11) записывают в виде (ось z направлена вниз)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial z}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[A\frac{\partial^2 W}{\partial z\,\partial t}\right], \qquad (12)$$

где $A = K\dfrac{d\psi}{d\left(\dfrac{\partial\psi}{\partial t}\right)}$ — величина, учитывающая влияние скорости высыхания на величину потенциала ψ.

Рассмотрим элементарный объем почвогрунта $ABCDD'C'B'A'$ на фоне дренажа в условиях орошения (рис. 6, *а*). Если уровень грунтовых вод сохраняется неизменным, то оросительная влага при поливе с интенсивностью инфильтрации ε идет на увеличение дренажного стока и на изменение влажности почвогрунта.

Суммарное приращение влаги в зоне аэрации за время Δt, приходящееся на единицу площади в плане, составит

$$\Delta W = \int_0^{z_i} [W(z, t+\Delta t) - W(z, t)]\,dz,$$

где $z_i = H_д - h_i$ — средняя глубина залегания поверхности грунтовых вод от поверхности земли в i-ом элементе ($H_д$ — глубина закладки дренажа; h_i — среднее превышение поверхности грунтовых вод в i-ом элементе над глубиной заложения дренажа).

Направляя ось z вниз от поверхности почвы, за основу примем уравнение

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial z}\right] - \frac{\partial K(W)}{\partial z}, \qquad (13)$$

где $z \in [0, L]$ — уровень грунтовых вод.

Воспользуемся, например, модифицированной конечно-разностной схемой Неймана-Эдди для интегрирования этого уравнения.

Частные производные уравнения (13) аппроксимируем следующим образом:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\kappa}(W_i^{j+1} - W_i^j) + O(\kappa^2);\\
&\frac{\partial}{\partial z}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial z} - K(W)\right]\Big\}_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{h}\left\{\left[D\left(W_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right)\times\right.\right.\\
&\times\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K\left(W_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right)\Big] - \left[D\left(W_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right)\times\right.\\
&\left.\left.\times\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K\left(W_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right)\Big]\right\} + O(h^2),\\
&\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{h}\left[\frac{1}{2}(W_{i+1}^{j+1} + W_{i+1}^j) - \frac{1}{2}(W_i^{j+1} +\right.\\
&\left.+ W_i^j)\right] + O(h^2);\\
&\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{h}\left[\frac{1}{2}(W_i^{j+1} + W_i^j) - \frac{1}{2}\times\right.\\
&\left.\times(W_{i-1}^{j+1} + W_{i-1}^j)\right] + O(h^2),
\end{aligned}
\right\} \qquad (14)
$$

$$z_i = ih \ (i = 1, 2, \ldots),$$

$$t_j = j\kappa \ (j = 0, 1, 2, \ldots),$$

где κ — временный шаг; h — координатный шаг.

В результате вместо уравнения (13) будем иметь конечно-разностную систему уравнений:

$$-A_i W_{i+1}^{j+1} + B_i W_i^{j+1} - C_i W_{i-1}^{j+1} = H_i. \qquad (15)$$

Коэффициенты A_i, B_i, C_i, H_i определяются следующим образом:

$$B_i = 2 + A_i + C_i;$$

$$A_i = \frac{\kappa}{h^2} D\left(W_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right);$$

$$C_i = A_{i-1};$$

$$H_i = A_i W_{i+1}^j + (2 - A_i - C_i) W_i^j + C_i W_{i-1}^j -$$

$$- 2\left(\frac{\kappa}{h}\right)\left[K\left(W_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right) - K\left(W_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}\right)\right].$$

Здесь нелинейные коэффициенты по И. Рубину определяются экстраполяцией с двух предыдущих временных слоев.

Большей точности можно добиться, если уточнять коэффициенты итерациями. Для этого перепишем уравнение (15) следующим образом:

$$- A_i^{(s)} W_{i+1}^{(s+1)} + B_i^{(s)} W_i^{(s+1)} - C_i^{(s)} W_{i-1}^{(s+1)} = H_i^{(s)},$$

где i — номер итерации на каждом временном слое s. В качестве начальной итерации выбирается значение с предыдущего временного слоя.

Итерационный процесс заканчивается при выполнении условия:

$$| W_i^{(s+1)} - W_i^{(s)} | \leqslant \varepsilon.$$

По примеру В. Гарднера, примем за основу следующие зависимости для характеристик почв:

$$D(W) = ae^{bw},$$

$$K(W) = ce^{bw},$$

где $0{,}0001$ м²/сут $< D(W) < 2$ м²/сут,

$0 < K < K(W) < K_w$, м/сут.

Решим уравнение вертикального влагопереноса при следующих краевых условиях:

$$W(0;\ t) = W_1;\ W(z;\ 0) = W_2;\ W(L;\ t) = n_0,$$

где W_1, W_2, n_0 — const, n_0 — пористость или влажность полного насыщения.

Эти условия физически соответствуют случаю промачивания почвы, имеющей вначале однородное влагосодержание, при постоянной влажности на поверхности и неизменном уровне грунтовых вод на глубине $z = L$.

При решении уравнения использовался метод прогонки. Коэффициенты $D(W)$ и $K(W)$ уточнялись итерациями. При анализе результатов расчета примера со следующими исходными данными: $L = 2$ м; $W_1 = 0{,}35$;

$W_2=0{,}15$; $n_0=0{,}4$; $D(W)=10^{-4}e^{23W}$; $K(W)=10^{-5}e^{23W}$ м/сут видно, что по ходу инфильтрационного процесса формируются два потока почвенной влаги: нисходящий и восходящий. Причем формирование второго связано с влиянием грунтовых вод. В некоторый момент оба потока смыкаются и происходит дальнейшее увлажнение почвы.

Согласно обобщенному закону Дарси, имеем:

$$v = K(W) - D(W)\frac{\partial W}{\partial z}. \qquad (16)$$

Для почв с малым коэффициентом фильтрации первое слагаемое мало и основной вклад в скорость перемещения влаги дает диффузионная составляющая. Причем до смыкания двух потоков в верхней зоне при увлажнении $\frac{\partial W}{dz} \leqslant 0$, а в нижней $\frac{dW}{dz} \geqslant 0$.

Поэтому для точек верхней зоны

$$v = v_{гр} + v_{диф}, \qquad (17)$$

а для точек нижней зоны

$$v = v_{гр} - v_{диф}. \qquad (17а)$$

В случае, указанном на рисунке 7, большие значения $D(W)$ [на два порядка выше, чем $K(W)$] и большие по абсолютной величине значения grad W во II зоне по сравнению с I зоной определяют некоторое преобладание восходящего потока влаги над нисходящим.

Решая численно уравнение влагопереноса в зоне аэрации, можно исследовать долю гравитации и диффу-

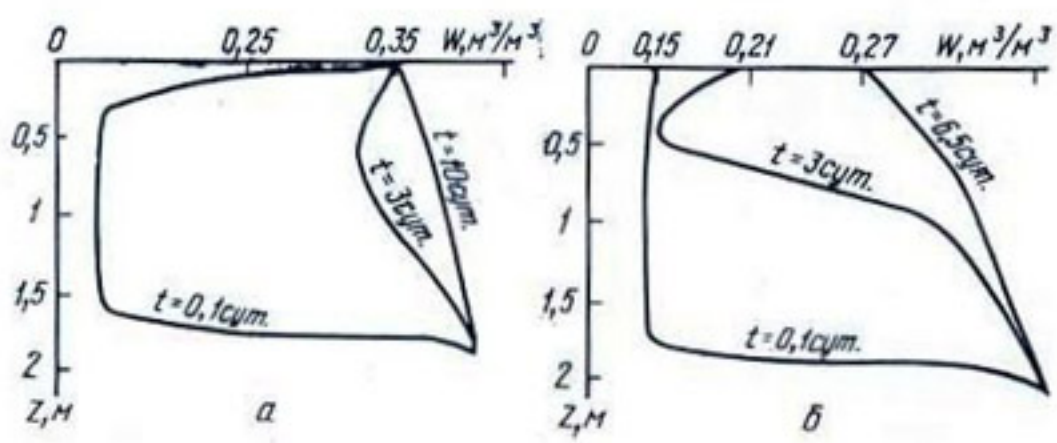


Рис. 7. Эпюра расчета изменения промачивания почвы при постоянной влажности на поверхности и неизменном уровне грунтовых вод: *а* — коэффициент диффузности на два порядка выше коэффициента водопроницаемости; *б* — при равных порядках коэффициентов диффузности и водопроницаемости.

зии в инфильтрационном процессе. На рисунке 7 приведены сопоставительные результаты расчета двух случаев увлажнения зоны аэрации.

I. Коэффициент диффузивности $D(W)$ на два порядка выше, чем коэффициент водопроницаемости $K(W)$:

$$D(W)=10^{-4}e^{23W};\ K(W)=10^{-6}e^{23W};$$

при $v^*=1{,}67;\ t^*=0{,}9;\ e^*=1{,}5.$

II. Оба коэффициента имеют один и тот же порядок:

$$D(W)=10^{-4}e^{23W};\ K(W)=10^{-4}e^{23W}$$

при $v^*=0{,}75;\ t^*=1{,}2;\ e^*=0{,}9,$

где v^* — средняя скорость продвижения фронта увлажнения, м/сут; t^* — время смыкания нисходящего и восходящего потоков, сут; e^* — глубина смыкания потоков, м.

Результат становится ясным при рассмотрении формулы (17). Для точек верхней зоны $v=v_{гр}+v_{диф}$ имеет большие положительные значения для случая II, а для точек нижней зоны $v=v_{гр}-v_{диф}$ имеет большие отрицательные значения для случая I.

На рисунке 7 видно, что в начальный период инфильтрации в нижней зоне идет интенсивный процесс диффузионного увлажнения почвы, не зависящий от условий на поверхности почвы.

Пусть в начальный момент времени на поверхности почвы влажность равна $W-W_1$. Уравнение (13) для случая установления перед поливом (то есть при $t\to\infty$) имеет вид

$$\frac{d}{dz}\left[D(W)\frac{dW}{dz}\right]-\frac{dK(W)}{dz}=0. \qquad (18)$$

Задавая $D(W)=ae^{bW}$, $K(W)=ce^{bW}$ и решая уравнения при условиях

$$W|_{z=0}=W_1,$$
$$W|_{z=L}=n_0,$$

получим профиль установления:

$$W=\frac{1}{b}\ln\left[\frac{(e^{n_0b}-e^{W_1b})e^{bcz/a}}{e^{bcL/a}-1}-\frac{e^{n_0b}-e^{(W_1b+bcL/a)}}{e^{bcL/a}-1}\right]. \qquad (19)$$

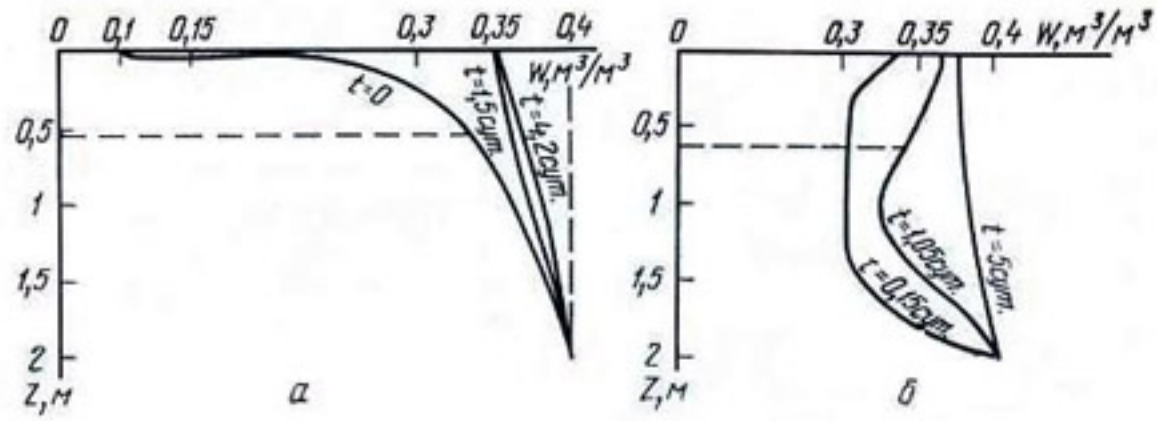


Рис. 8. Профили влажности в процессе орошения (*а*) и в межполивной период (*б*) при заданных потоках влаги на поверхности.

Пусть перед началом полива влажность на поверхности почвы $W = W_1$. Считая, что влажность в зоне аэрации к моменту полива соответствует установившемуся положению, придем к краевой задаче — решению уравнения (12) при условиях:

$$W(O; t) = W_2(t),$$

$$W(L; t) = n_0,$$

$$W(z; 0) = \psi(z).$$

На рисунке 8, *а* представлены профили влажности для случая, когда начальный профиль вычисляется по формуле (19) при следующих исходных данных: $a = 10^{-4}$; $b = 23$; $c = 10^{-4}$; $W = 0{,}35$; $W_1 = 0{,}1$; $L_1 = 2$; $n_0 = 0{,}4$.

Предыдущие задачи решались исходя из того, что на поверхности почвы имелось условие: $W(0, t) = W_1 = \text{const}$.

При поливах более правильно задавать расход на поверхности почвы. В этом случае здесь ставится условие: $q(0; t) = R(t)$ — поток влаги на поверхности почвы, который должен соответствовать закону Дарси, или иначе закону впитывания по А. Н. Костякову.

$$q \leqslant -K(W)\frac{dh}{dz}.$$

Вышеизложенные условия могут быть записаны в виде

$$\left.\frac{\partial W}{\partial z}\right|_{z=0} = -\frac{R(t) - K(W)}{D(W)}. \qquad (20)$$

К этому добавляются еще два условия:

$$\left.\begin{aligned} W(z;0) &= \psi(z) \\ W(L;t) &= n_0. \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

Результаты численного решения приведены на рисунке 8, *б*. Входные данные здесь:

$$D(W) = 10^{-4}e^{23W};\ K(W) = 10^{-5}e^{23w}$$

$$n_0 = 0{,}4;\ \psi(z) = 0{,}3;\ R(t) = 0{,}06.$$

На основе приведенной выше методики расчета для элементарного слоя по сечению $ADD'A'$ (рис. 6) можно определить время инфильтрации до того момента, пока влажность во всем слое до уровня грунтовых вод (УГВ) не достигнет $W_{\text{ППВ}}$ при заданной инфильтрации воды на поверхности почвы, и количество воды, которое необходимо для этого затратить. При подаче воды сверх этого количества инфильтрация создает поток ε_i, который для УГВ выше дна дрены формирует дренажный сток $Д_i$. Анализируя приведенные расчеты, можно сделать следующие выводы:

если во время полива не ставится цель создать промывные токи, то необходимые параметры влажности в корнеобитаемой зоне могут быть обеспечены в указанных примерах очень быстро, после чего нет необходимости продолжать инфильтрацию, которая будет увеличивать только расход непродуктивной влаги;

для ускорения повышения влажности в зоне аэрации до ППВ и последующего создания промывных гравитационных токов можно, например, перед началом полива подпирать дрену, стимулируя ускорение подъема УГВ и капиллярной каймы с последующим наложением на нее полива.

После обеспечения промывной доли задача влагопереноса должна решаться для случая с переменным уровнем грунтовых вод при наличии инфильтрации. Рассмотрим эту задачу для элементарного объема. При перемещении свободной поверхности закон ее движения должен определяться из уравнений для зоны полного насыщения грунта.

В этом случае, строго говоря, задача перестает быть одномерной, при вычислении влажности в зоне аэрации в рассмотрение вводится горизонтальная координата x.

Форма свободной поверхности определяется зависимостью $y=y\,(x,\,t)$. Направляя ось z вертикально вверх, запишем уравнение влагопереноса:

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D\,(W)\,\frac{dW}{dz}\right]+\frac{\partial K\,(W)}{\partial z}, \tag{22}$$

где $z\in[y\,(x;\,L)]$.

Пусть T — интересующий нас период инфильтрации. Перейдем к безразмерным переменным:

$$\left.\begin{aligned}&\tau=\frac{t}{T};\quad s=\frac{z-y\,(x;\,t)}{L-y\,(x;\,t)};\\&\tau\in[0;\ \infty];\ S\in[0;\ 1].\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Тогда уравнение (22) перепишется следующим образом:

$$\frac{\partial W}{\partial\tau}=\frac{T^*}{[L-y\,(x;\,t)]^2}\,\frac{\partial}{\partial s}\left[D\,(W)\,\frac{dW}{ds}\right]+$$

$$+\frac{T^*}{[L-y\,(x;\,t)]}\,\frac{\partial K\,(W)}{\partial s}. \tag{24}$$

Следовательно, зная $y=y\,(x,\,t)$, можно поставить краевую задачу для уравнения (24).

В случае одномерного по горизонтали потока течение в зоне полного насыщения описывается уравнением Буссинеска:

$$\mu\,\frac{\partial h}{dt}=\frac{K}{2}\,\frac{\partial\,(h^2)}{\partial x^2}+\varepsilon, \tag{25}$$

где $h=h(x;\,t)$ — напор на свободной поверхности (в данном случае $h=y(x;\,t)$.

Рассмотрим задачу о перемещении влаги в зоне аэрации, когда нижняя граница представляет собой растекающийся бугор грунтовых вод. Начальная форма бугра — полуэллипс.

Представляя решение уравнения (25) в виде

$$h=(x;\,t)=A\,(t)+B\,(t)\,x^2, \tag{26}$$

получим два обыкновенных дифференциальных уравнения относительно $A\,(t)$ и $B\,(t)$. При учете начальных условий получим решение в виде

$$h(x;\,t)=\frac{h_0}{\left(1+6\,\frac{Kh_0}{\mu a_0^2}\,t\right)^{\frac{1}{3}}}\left[1-\frac{x^2}{a_0^2\left(1+6\,\frac{Kh_0}{\mu a_0^2}\,t\right)^{\frac{2}{3}}}\right]-$$

$$-\frac{\varepsilon a_0^2}{8\,\frac{Kh_0}{\mu}\left(1+6\,\frac{Kh_0}{\mu a_0^2}\,t\right)}\left[1-\left(1+6\,\frac{Kh_0}{\mu a_0^2}\,t\right)^{\frac{4}{3}}\right]. \qquad (27)$$

Решим уравнение (24) при $y\ (x,\ t)=h\ (x;\ t)$, заданных формулой (27)

$$W(1;\,t)=W_1=0{,}35,$$

$$W(s;\,0)=W_0=0{,}2,$$

$$W(0;\,t)=n_0=0{,}4.$$

Поверхность почвы задается условием $s=1$, а уровень грунтовых вод $s=0$.

Остальные параметры: $T^*=10$ сут.; $L=6$ м; $h_0=1$ м; $a_0=4$ м; $\mu=0{,}15$; $D(W)=10^{-4}W$ м²/сут.; $K(W)=10^{-5}\,e^{23W}$ м/сут.

На рисунке 9, *а* приведены графики влажности для точки $x=0$. Закон движения этой точки определяется из уравнения (27), если $x=0$. При растекании бугра зона аэрации расширяется. Однако благодаря подпитке со стороны грунтовых вод нижняя часть зоны, примыкающая к растекающемуся бугру, имеет водосодержание, близкое к $W_{\text{пв}}$. К моменту времени $t=6$ сут. влажность в зоне несколько стабилизируется, изменяясь лишь незначительно (примерно на 0,001) при дальнейшем растекании бугра.

На рисунке 9, *б** представлены результаты расчета для случаев, когда на поверхности почвы ставится краевое условие:

$$\left.\frac{dW}{ds}\right|_{s=1}=-\frac{R-K(W)}{D(W)}\,[L-y(x;\,t)] \qquad (28)$$

соответствующее поступлению влаги извне с заданным расходом R. Остальные условия и параметры — прежн-

---

* Расчеты, результаты которых представлены на рисунках 7, 8 и 9, выполнены С. Н. Новосельским.

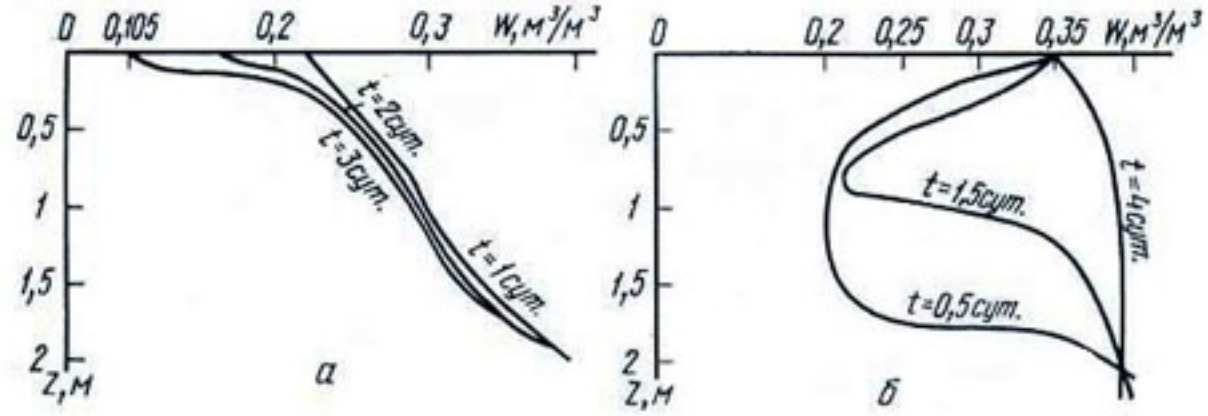


Рис. 9. Профили влажности при растекании бугра уровня грунтовых вод для точки $x=0$:
а — без учета инфильтрации; *б* — с учетом инфильтрации.

ние. В нашем случае $R=0{,}05$ м/сут. Начальное распределение влаги бралось так: при $s=1$, $W=0{,}1$, а при $s=0$, $W=0{,}4$. Как и в предыдущем случае, графики приведены для вершины бугра, то есть для точки $x=0$.

При установившемся движении грунтовых вод можно провести несложный качественный анализ процесса влагопереноса.

В уравнении (23) $s \in [1,0]$. Введем еще одну замену переменных:

$$\xi = -(s-1). \tag{29}$$

Тогда уравнение (24) перепишется:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{T^*}{[L-y(x;\tau)]^2}\frac{\partial}{\partial \xi}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial \xi}\right] - \frac{T^*}{L-y(x;\tau)}\frac{\partial K(W)}{\partial \xi}. \tag{30}$$

Пусть при $t \longrightarrow \infty$; $y(x;\tau) \longrightarrow y_0(x)$.

Тогда имеем уравнение установления:

$$\frac{T^*}{[L-y_0(x)]^2}\frac{\partial}{\partial \xi}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial \xi}\right] - \frac{T^*}{L-y_0(x)}\frac{\partial K(W)}{\partial \xi} = 0. \tag{31}$$

Так как переменная x играет здесь роль параметра, то это обыкновенное дифференциальное уравнение относительно W. Перепишем его так:

$$\frac{\partial}{\partial \xi}\left[\frac{D(W)}{L-y_0(x)}\frac{\partial W}{\partial \xi} - K(W)\right] = 0. \tag{31а}$$

Это выражение отличается от уравнения установления для постоянного уровня грунтовых вод только мно-

жителем $\frac{1}{L-y_0(x)}$ перед $D(W)$. Поэтому можно записать решение уравнения (31) при условиях:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dW}{d\xi}=-\frac{R-K(\bar{W})}{D(W)}[L-y_0(x)];\ W\mid_{\xi=1}=h_0 \\ &W=\frac{1}{b}\ln\left\{\left(e^{h_0 b}-\frac{R}{C}\right)e^{\frac{bc}{a}[L-y_0(x)](\xi-1)}+\frac{R}{c}\right\}. \end{aligned}\right\} \quad (32)$$

Следовательно, решение здесь существенно зависит от поведения свободной поверхности.

Возвращаясь к переменной z, получим

$$W=\frac{1}{b}\ln\left\{\left(e^{h_0 b}-\frac{R}{C}\right)e^{\frac{bc}{a}[L-y_0(x)]}+\frac{R}{c}\right\}. \quad (33)$$

При прогнозировании изменения влажности в зоне аэрации важное значение приобретает установление параметров $D(W)$ и $K(W)$. Методика их определения разработана в САНИИРИ М. Б. Баклушиным и Ю. А. Гольцевым.

Переходя к реальной инфильтрации на фоне горизонтального дренажа в период полива, надо учесть, что эта задача пространственная. Сложность ее возрастает еще и от того, что положение уровня грунтовых вод зависит от гидрогеологического строения среды, междренного расстояния, глубины дренажа и его конструкции, интенсивности инфильтрации и др. Таким образом, внутри области фильтрации будет существовать подвижная граница, разделяющая эту область на зоны полного и неполного насыщения. Закон же движения этой границы заранее неизвестен. Даже в случае, когда задачу можно рассматривать как двумерную, возникают значительные трудности при ее реализации из-за наличия различных скоростей фильтрации как функции координат и времени. Например, в центре междренья увлажнение до ППВ всей орошаемой толщи и начало формирования промывной доли будут происходить быстрее вследствие того, что здесь незначительны скорости фильтрации (намного меньше, чем в зоне, прилегающей к дрену).

Точное решение задач дренажного потока в общем случае получить очень сложно. Однако в зависимости от гидрогеологических и мелиоративных условий можно

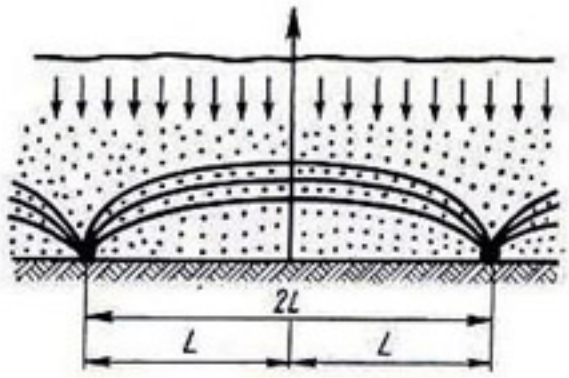


Рис. 10. Схема к расчету депрессионной кривой при движении бугра грунтовых вод к дрене на водоупоре.

применить ту или иную упрощенную математическую модель, вполне отражающую физику явлений, происходящих в пористой среде.

В исследуемой области фильтрации при прогнозировании водного режима в заданных пределах его изменения возникают взаимосвязанные проблемы, для решения которых необходимо уметь вычислять эффективное междренное расстояние, глубину дрен с учетом их несовершенства, уровень грунтовых вод, дренажный сток, гидрогеологические параметры и др. Их определяют обычно из решения соответствующих балансовых уравнений с учетом результатов полевых и лабораторных исследований.

Примеры решения задач, основанных на балансовых уравнениях в дифференциальной форме при безнапорном режиме фильтрации приведены в работе Ф. Б. Абуталиева, М. Б. Баклушина, Я. С. Ербекова и др. (1975).

Рассмотрим плоскую задачу (рис. 10) о движении бугра грунтовых вод, стекающих с дрены на водоупоре, при наличии инфильтрации (Баклушин, 1964). Ось x направлена по водоупору, на расстоянии $2L$ друг от друга размещены точечные горизонтальные дрены. Предполагается, что дрены питаются за счет инфильтрации, интенсивность которой обозначается через $\varepsilon(x; t)$.

Запишем уравнение в виде:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{2\mu}\frac{\partial^2 H^2}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon}{\mu}.$$

Переходя от размерных величин к безразмерным и принимая

$$h(\xi;\ \tau) = \frac{H}{H_0};\ \xi = \frac{x}{L};\ \tau = \frac{KH_0}{2\mu L^2}t,$$

получим уравнение:

$$\frac{\partial h^2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 h^2}{\partial \xi^2} + \frac{2L^2\varepsilon}{H_0^2 K}. \qquad (34)$$

Здесь в качестве H_0 можно принять любое фиксированное значение $H \neq 0$. Выберем $H_0 = H\ (0, 0)$. Обозначим выражение $\frac{2L^2\varepsilon}{KH_0^2}$ через $f(\xi, \tau)$, тогда уравнение (34) можно записать так:

$$\frac{\partial h(\xi; \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 h^2}{\partial \xi^2} + f(\xi; \tau). \tag{35}$$

Будем считать, что функция $h(\xi, \tau)$ удовлетворяет уравнению эллипса:

$$\xi^2 + \frac{h^2(\xi; \tau)}{B^2(\tau)} = 1, \tag{36}$$

где $B(\tau)$ — малая полуось эллипса, которая является функцией от τ, подлежащей определению.

Решим уравнение (36) относительно

$$h^2(\xi; \tau) = B^2(\tau)(1 - \xi^2),$$

откуда

$$h(\xi; \tau) = \sqrt{1 - \xi^2} B(\tau). \tag{37}$$

Из формулы (37) следует

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial h(\xi; \tau)}{\partial \tau} &= \sqrt{1 - \xi^2} \frac{dB(\tau)}{d\tau}; \\ \frac{\partial^2 h^2(\xi; \tau)}{\partial \xi^2} &= 2B^2(\tau). \end{aligned}\right\} \tag{38}$$

Подставляя вышеизложенные значения этих частных производных в формулу (35), получим

$$\sqrt{1 - \xi^2} \frac{dB(\tau)}{d\tau} + 2B^2(\tau) = f(\xi: \tau). \tag{39}$$

Закон инфильтрации определяется из этого уравнения. При $\xi = 0$ уравнение (39) запишется так:

$$\frac{dB(\tau)}{d\tau} + 2B^2(\tau) = f(0; \tau);\ f(0; \tau) > 0. \tag{40}$$

Считая, что $f(0; \tau) = d_0 = \text{const}$, то есть в центре междренья инфильтрационный расход постоянен, после интегрирования уравнения (40), получим

$$\frac{1}{\sqrt{2\varepsilon}} \ln \frac{B(\tau) - \sqrt{\frac{d_0}{2}}}{B(\tau) + \sqrt{\frac{d_0}{2}}} = -2\tau + C. \tag{41}$$

При $\tau=0$ следует, что $h=1$, $B=1$. Используя начальные условия, из формулы (41) определяем

$$C=\frac{1}{\sqrt{2d_0}}\ln\frac{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}.$$

Затем из этого же выражения получаем:

$$B(\tau)=\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{2}}\,\frac{1+e^{-2\sqrt{2d_0}\tau}\,\dfrac{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}{\sqrt{2}+\sqrt{d_0}}}{1-e^{-2\sqrt{2d_0}\tau}\,\dfrac{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}{\sqrt{2}+\sqrt{d_0}}}.$$

С помощью уравнения (41) получим

$$h(\xi;\ \tau)=\sqrt{1-\xi^2}\,\sqrt{\frac{d_0}{2}}\,\frac{1+e^{-2\sqrt{2d_0}\tau}\,\dfrac{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}}{1-e^{-2\sqrt{2d_0}\tau}\,\dfrac{\sqrt{2}-\sqrt{d_0}}{\sqrt{2}+\sqrt{d_0}}}. \quad (42)$$

Переходя к пределу в этой формуле при $\tau\longrightarrow\infty$, найдем

$$\frac{h^2}{\frac{d_0}{2}}+\xi^2=1.$$

То есть при установившемся режиме кривая депрессии принимает форму эллипса, с полуосями $\sqrt{\frac{d_0}{2}}$ и 1, что совпадает с формой бугра в задаче В. А. Васильева (1955), которая решена в гидромеханической постановке для установившегося режима. Формулу (42) перепишем в размерных величинах. Окончательно получим

$$H(x;\ t)=\sqrt{2\,\frac{\varepsilon_0}{K}\,(L^2-x^2)}\,\frac{1+e^{\frac{-2\sqrt{\varepsilon_0^*Kt}}{L\mu}}\,\dfrac{\sqrt{K}H_0-L\sqrt{\varepsilon^*}}{\sqrt{K}H_0+L\sqrt{\varepsilon^*}}}{1-e^{\frac{-2}{L\mu}\sqrt{\varepsilon^*Kt}}\,\dfrac{\sqrt{K}H_0-L\sqrt{\varepsilon^*}}{\sqrt{K}H_0+L\sqrt{\varepsilon^*}}},$$

где ε^* — значение инфильтрации в центре междуречья.

Большинство решений построено для уравнения Буссинеска при различных способах его линеаризации*. К ним относится и известное решение С. Ф. Аверьянова (1959), определяющее форму кривой депрессии при работе горизонтального дренажа в случае близкого залегания водоупора и имеющее вид

$$H(t) = \eta - \frac{32}{n^3}(\eta - H_0)\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n \frac{e^{-(2n+1)^2 x^2 t}}{(2n+1)^3},$$

где

$$\eta = \frac{qB(B+8\Phi_д)}{4KT_{ср}};\quad \Phi_д = 0{,}73\,T_{ср}\lg\frac{T_{ср}}{\pi d},$$

$T_{ср}$ — среднее значение глубины грунтовых вод до водоупора; B — междренное расстояние; d — диаметр дрены; t — время; q — интенсивность фильтрации; $\Phi_д$ — фильтрационное сопротивление на вход в дрену; K — коэффициент фильтрации.

Для водоупора, залегающего на неограниченной глубине, точного аналитического решения для определения формы депрессии при неустановившемся режиме фильтрации пока не имеется. Существует ряд приближенных решений, о которых будет сказано ниже.

Остановимся теперь более детально на физике и анализе явлений, происходящих в почвогрунте при взаимодействии инфильтрации (испарения) с грунтовыми водами с учетом их растекания на фоне горизонтального дренажа, и приведем ряд приближенных решений, построенных на основе полевых и теоретических исследований.

Для случая, изображенного на рисунке 6, *а*, при работе систематического горизонтального дренажа и равномерной инфильтрации ε_i на участке $0 \leqslant x \leqslant 1$ (вследствие симметрии выбрана область $0 \leqslant x < 1/2$) корнеобитаемая толща в сечении *I—I* за рассматриваемый период t_i увлажняется до ППВ быстрее, чем в сечении *II—II* вблизи дрены за время t' $(t' > t_i)$. После достижения времени t_i в сечении *I—I* инфильтрация будет затрачиваться на создание дренажного стока и подъема уровня грунтовых вод. При этом будет происходить постепенное увеличение доли инфильтрации, идущей на дренажный сток. Примем в качестве расчетного сечение *I—I*, учитывая, что тем самым будет создаваться определенный коэффициент запаса в расчетах дренажа.

* Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М., «Наука», 1969.

Построенный характер взаимодействия дренажа и орошения определяется и тем, что интенсивность инфильтрации зависит в основном от техники полива, от наложения ее на схему дренажа. При дождевании инфильтрация может быть принята равномерной в объеме интенсивности дождевания за единицу времени за минусом эвапотранспирации в период полива. При бороздковом поливе процесс осложняется неравномерностью полива по длине борозды в процессе добегания струи. Здесь могут представиться несколько сочетаний дренажа и техники полива. Расчетная инфильтрация может здесь приниматься исходя из зависимости, введенной Н. Т. Лактаевым:

$$qt = a \int_0^x m(\xi)\, d\xi + \omega x, \qquad (43)$$

где a — ширина между бороздами; $m(\xi)$ — количество влаги, приходящейся на единицу ширины борозды в сечении $x=\xi$ и профильтровавшейся в почву за время t; ω — среднее живое сечение струи в борозде или глубина при поливе напуском, определяемая эмпирической зависимостью $\omega=f(i, q)$; i — уклон борозды; q — расход; t — время; x — длина пробега струи на момент времени t.

С помощью расчета можно определить тот коэффициент запаса, который получаем в параметрах дренажа, заменяя неравномерную эпюру инфильтрации равномерной для каждой схемы сочетаний дренажа и полива (рис. 11).

Для сечения $I—I$ (рис. 6, $а$) при равномерной инфильтрации рассмотрим теперь взаимодействие во времени работы дренажа и хода поливов для безнапорного питания ($\underline{\text{П}}>\underline{\text{О}}$).

При отсутствии осадков от начала вегетации до первого полива (рис. 12) растения и почва расходуют на транспирацию и испарение запасы влаги почвы. В результате этого понижается уровень грунтовых вод от $h_0<h_д$ до h_0^1, имеется незначительное суммарное испарение из грунтовых вод и повышается минерализация грунтовых вод от C_0 до C_0^1. В период t_{0_1} начинается первый полив, продолжающийся до $t_{к_1}$. В первом приближении можно считать, что за время t_0 до t_{0_1} увлажняется поливная зона, в процессе которого уровень грунтовых вод можно принять неподвижным. После этого часть инфильтрационной воды ε_i идет на подъем уровня грунто-

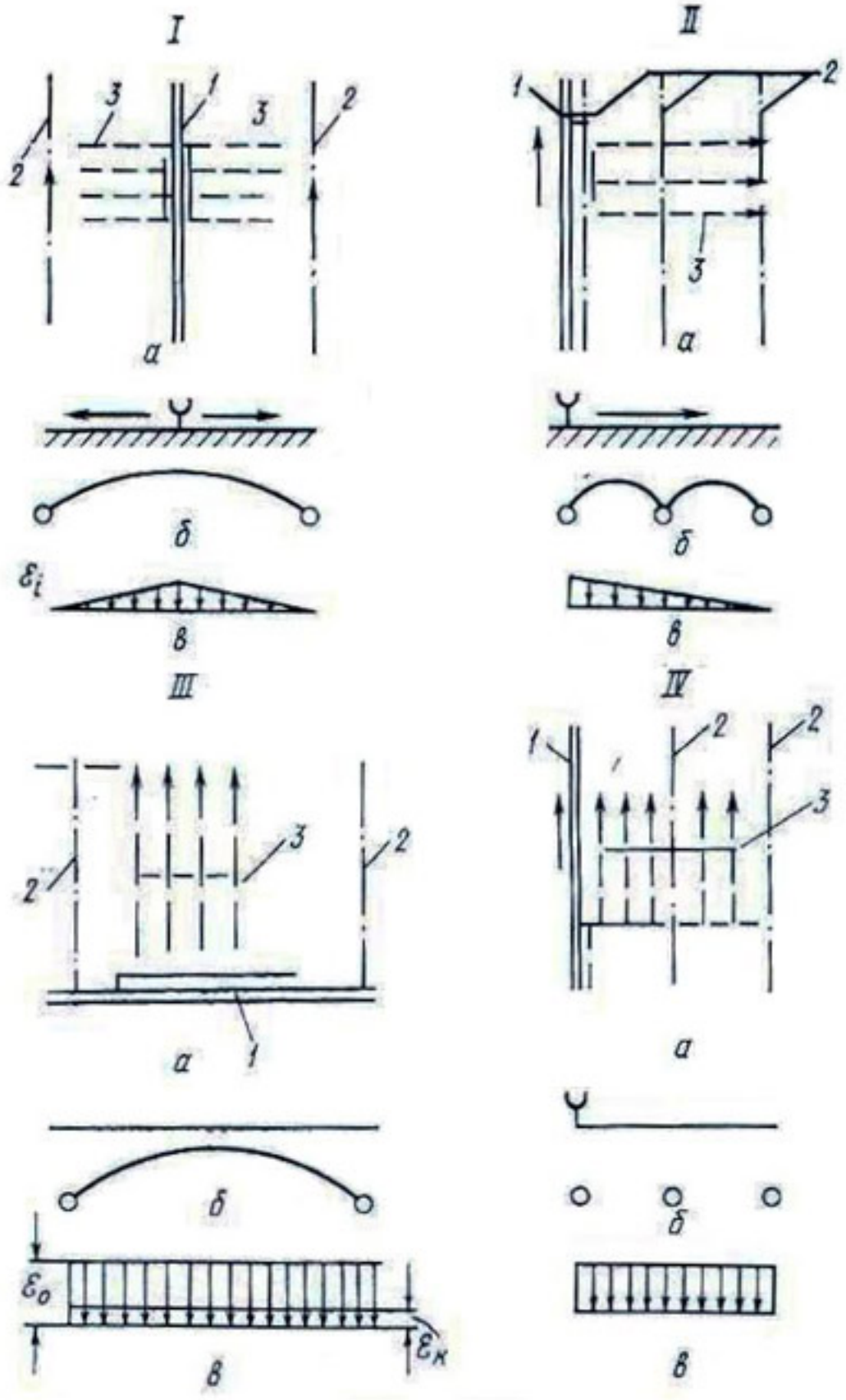


Рис. 11. Схемы сочетания дренажа и техники полива:

I — поперечная симметричная; *II* — поперечная несимметричная; *III* — продольно-поперечная; *IV* — продольная; *а* — план; *б* — разрез; *в* — интенсивность инфильтрации (эпюра); *1* — лоток; *2* — дрены; *3* — направление полива.

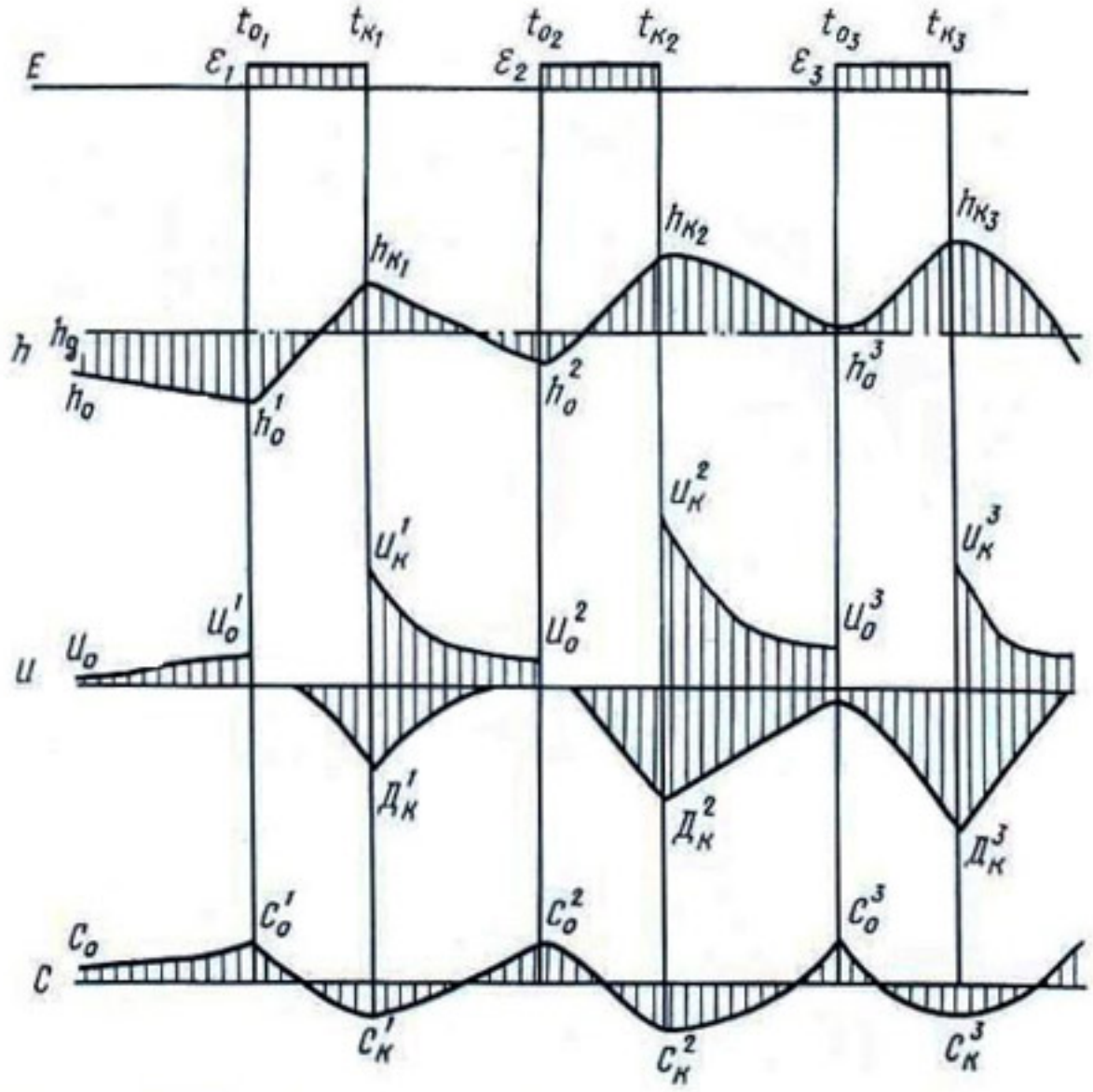


Рис. 12. Динамика грунтовых вод, минерализации, испарения и дренажного стока при орошении на фоне дренажа:

E — интенсивность полива; *h* — уровень грунтовых вод; *И* — испарение; *Д* — дренажный сток; *C* — минерализация грунтовых вод.

вых вод до $h_{к_i} > h_д$. Другая часть будет формировать дренажный сток, который начинается после превышения уровнем грунтовых вод рабочей отметки дренажа $h_д$ и достигает максимума $q^1_{д_к}$ при окончании полива, затем постепенно уменьшается в межполивной период по мере снижения уровня грунтовых вод. В этот же период изменяется минерализация грунтовых вод при попадании в них инфильтрующихся вод и дренажного стока до $C^1_к$. В период инфильтрации соленакопления в зоне аэрации почвогрунтов не наблюдается, так как восходящие токи отбора воды растениями и испарением из почвы погашаются нисходящими токами водоподачи O_1. Испарение из грунтовых вод начинается после прекращения первого

полива. При этом уровень грунтовых вод снижается от $h_{к_1}$ до h_0^2 за время от $t_{к_1}$ до t_{0_2} под влиянием расходования грунтовых вод на испарение, растекания инфильтрационного бугра и дренажного расхода. Минерализация грунтовых вод повышается от $C_к$ до C_0^2. Далее весь цикл повторяется аналогично первому поливу. Баланс инфильтрующейся воды за первый полив может быть записан так:

$$L\int_{t_{0_1}}^{t_{к_1}}\varepsilon_1 dt = \mu\int_0^L \Delta h(x, t)\,dt + \int_{t_{q_1}}^{t_{к_1}} q_д dt, \qquad (44)$$

где $q_д$ — дренажный сток, приходящийся на единицу площади в плане bL; b и L — ширина и длина рассматриваемой области; $\Delta h\ (x, t)$ — приращение уровня грунтовых вод при $t_{0_1} \leqslant t \leqslant t_{к_1}$ t_{q_1} — время начала сработки дренажа $(t_{0_1} < t_{q_1} < t_{к_1})$.

$$\int_0^L \Delta h\,(x, t)\,dx \approx (h_{к_1} - h_{0_1})\,L. \qquad (45)$$

Из формулы (44) следует, что до $t \leqslant t_{q_1}$

$$L\int_{t_{0_1}}^{t_{q_1}}\varepsilon_1 dt = \mu\int_0^L \Delta h_д\,(x, t)\,dx \approx \mu\,(h_{q_1} - x_{0_1})\,L.$$

Отсюда

$$t_{q_1} \approx \frac{\mu\int_0^L \Delta h\,(x, t)\,dx}{L} \approx \frac{\mu\,(h_{q_1} - h_{0_1})}{<\varepsilon_1>} + t_{0_1}, \qquad (46)$$

где $\Delta h_д(x, t)$ — приращение уровня грунтовых вод при $t_{0_1} < t < t_{q_1}$ от h_{0_1} до h_{q_1}.

При $t_{q_1} \leqslant t \leqslant t_{к_1}$, заменив дренажный сток его средним значением $<q_д>$, получим

$$<q_д>\,(t_{к_1} - t_{q_1}) = L\int_{t_{q_1}}^{t_{к_1}}\varepsilon_1 dt - \mu(h_{к_1} - h_{0_1}),$$

откуда

$$<q_д> = \frac{\int_{t_{q_1}}^{t_{к_1}} \varepsilon_1 dt - \mu(h_{к_1} - h_{0_1})}{t_{к_1} - t_{q_1}}. \quad (47)$$

Если параметры дренажа известны, определение $q_д$ и $h_{к_1}$ не представляет труда, так как из характеристики самого дренажа можно получить уравнение в зависимости от его параметров (глубины, междренного расстояния, гидрогеологического строения), воспользовавшись, например, известными формулами С. Ф. Аверьянова для однородного пласта при неглубоком залегании водоупора.

После прекращения полива наступает межполивной период и обратный такт неустановившегося режима работы дренажа, характеризующегося воздействием трех факторов: испарения, растекания и дренажного стока.

Для достаточно глубокого водоупора, исходя из ряда допущений, Х. И. Хаммад получил выражение

$$H = H_0 e^{-\alpha t}, \quad (48)$$

где $\alpha = \frac{\pi K}{\mu l \log\left(1 + \frac{2l}{\pi r}\right)}$; H — напор на дрене в момент времени t; H_0 — напор на дрене в начальный период; r — радиус дренажной трубы; μ — коэффициент водоотдачи; $2l$ — междренное расстояние; K — коэффициент фильтрации.

Аналогичное решение дает П. Д. Дилеман для расходов:

$$\log \frac{q_0}{q_t} = \frac{\pi^2 K d}{2{,}3 \mu L^2} t,$$

где q_0 и q_t — соответственно расходы дренажа при $t=0$ и $t>0$.

Следует отметить, что две последние формулы не учитывают испарение.

А. Я. Олейник и В. П. Насиковский (1969) предложили методику расчета систематического линейного горизонтального дренажа с учетом испарения для неустановившейся фильтрации, по которой превышение точки депрессионной кривой посредине междренья определяется по приближенной формуле

$$h(t) = h + (h - h_q)\beta_1(\bar{t}) - \frac{EL_1^2}{T}\beta_2(\bar{t}), \qquad (49)$$

а приток в дрену — по уравнению

$$q(t) = \frac{2T}{L}(h_0 - h_q)\rho_1(\bar{t}) + 2\varepsilon L[1 - \rho_2(\bar{t})], \qquad (50)$$

где β и ρ — коэффициенты, зависящие от $\bar{t} = tT/\mu L^2$ и параметра несовершенства дренажа $C = L/2\Phi$.

Попытку одновременно учесть и суммарное испарение и дренажный сток для центра междренья делал А. М. Сойфер, приняв уровень грунтовых вод в процессе полива постоянным.

В этих формулах предполагается, что испарение и транспирация непосредственно сразу воздействуют на уровень грунтовых вод и снижают его, причем интенсивность этого влияния уменьшается по мере сработки.

Наблюдения В. А. Духовного за характером снижения уровня грунтовых вод показали, что в начальный период максимальный наклон кривой $\Delta h = f(t)$ наблюдается не после прекращения полива, как следовало бы из простого сложения скоростей снижения, а несколько позже. Это объясняется тем, что в первый период после завершения полива влага из зоны аэрации интенсивно расходуется в основном на испарение и частично на транспирацию. При влажности ниже ППВ в пределах увлажнения капиллярная кайма начинает подсасывать влагу из грунтовых вод, вызывая снижение их уровня (рис. 13).

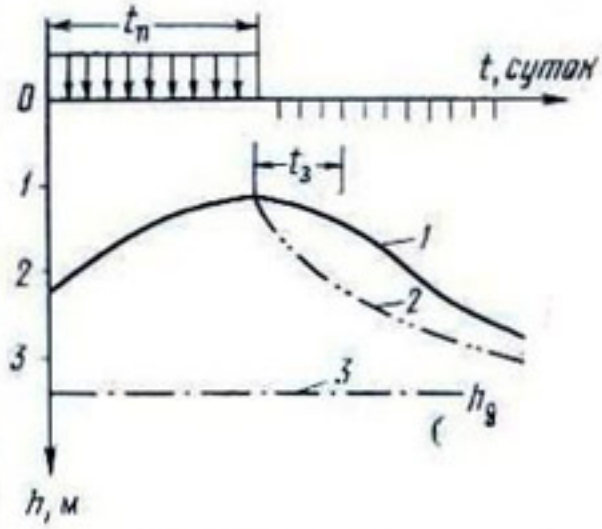


Рис. 13. Эффект запаздывания темпов сработки уровня грунтовых вод после прекращения полива в совхозе № 7 Голодной степи:
1 — кривая фактического снижения уровня грунтовых вод; *2* — расчетная кривая; *3* — отметки дренажа: $t_п$ — поливной период; $t_з$ — период запаздывания.

В большинстве существующих в нашей стране и за рубежом методик расчета хода суммарного испарения в зависимости от уровня грунтовых вод принимается, что на создание вертикальных потоков влаги вверх одинаково влияют и физическое испарение и транспирация. Это в определенной

степени справедливо для культур сплошного сева (пшеница, люцерна и др.), но для культур пропашных, особенно широкорядных, такое допущение неприемлемо.

В работах С. Ф. Аверьянова, С. И. Харченко, А. И. Будаговского и других испарение и транспирация считаются действующими с поверхности земли и рассматриваются в виде одного члена — суммарного испарения. У С. Роулинса, В. Шильфгарда, П. Раатса физическое испарение отделяется от транспирации: первое (физическое испарение) принимается действующим с поверхности земли, а второе (транспирация) равномерно распределено по площади, но интенсивность его изменяется по глубине z, при этом распределение интенсивности отбора влаги корнями соответствует следующей зависимости:

$$\lambda = \frac{Tp}{\delta} \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right),$$

где δ — глубина распространения корневой зоны.

По-иному интенсивность отбора влаги корневой системой была рассчитана А. И. Голованова на основании дифференциального уравнения при определенных начальных и граничных условиях:

$$C_w \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_w \frac{\partial H}{\partial z}\right) - e_w,$$

где C_w — коэффициент влагоёмкости; $C_w = \partial W / dn$ (при полном насыщении $C_w = 0$); K_w — коэффициент влагопроводности, принятый им по С. Ф. Аверьянову; e_w — интенсивность отбора влаги корнями растений (размерность: 1/сутки), принятая по глубине на каждый момент пропорционально влажности почвы W.

Суммарное водопотребление пропашных культур и, в частности, хлопчатника, состоящее из испарения и транспирации, в процессе роста растений изменяется, возрастая от начала вегетации к периоду массового цветения (рис. 14). При этом изменяется и взаимоотношение между испарением и транспирацией. Доля первого уменьшается по мере увеличения затенения поверхности почвы, а доля второго увеличивается пропорционально росту площади активной поверхности корней, которую приближенно можно заменить активной массой корней.

Испарение определяется потоком тепла, проникающим непосредственно до поверхности испаряемой воды, и водоотдачей почвы при различной влажности.

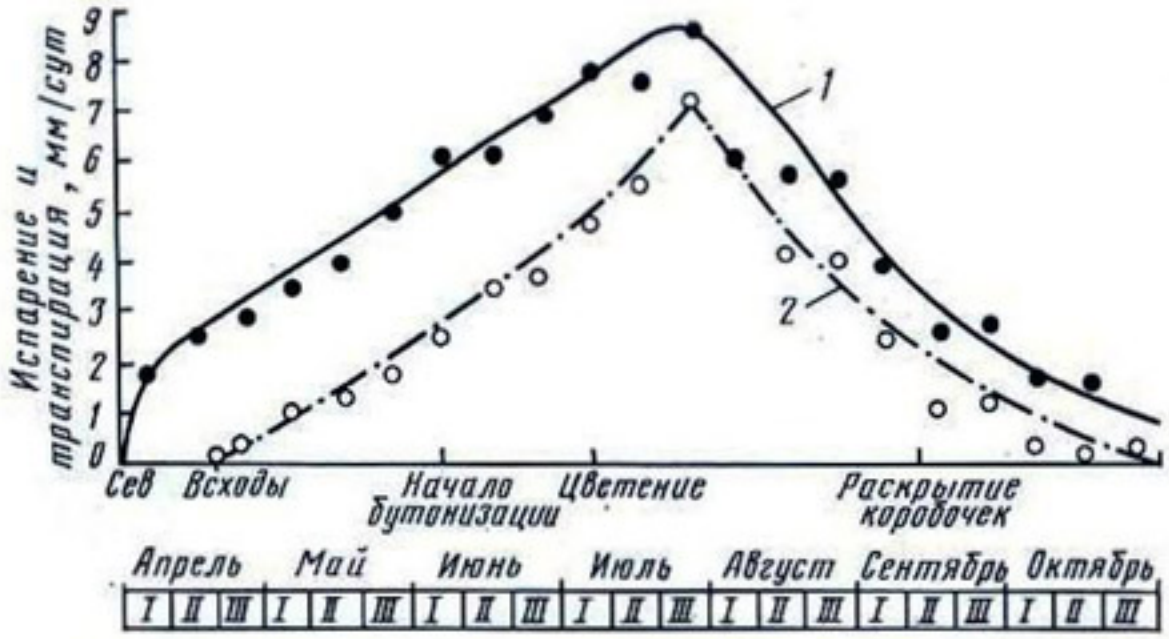


Рис. 14. Динамика испарения (*1*) и транспирации (*2*) на посевах хлопчатника в Голодной степи (совхоз № 1а, 1976 г.).

Работами А. В. Лыкова, С. В. Нерпина, А. Ф. Чудновского и А. П. Глобуса установлено, что при влажности, превышающей ППВ, испарение с поверхности водных частиц на поверхности почвы постоянно и характеризуется величиной

$$E_{п_0} = \frac{Dp_s M (1 - S_0)}{RTX_0}, \qquad (51)$$

где D — коэффициент диффузии пара в воздухе; X_0 — приведенная толщина поверхностного пограничного слоя; p_s — парциальное давление насыщенного пара при температуре воздуха T; M — масса грамм-молекул воды; S_0 — относительная влажность воздуха; R — универсальная газовая постоянная.

При этом почва представляется здесь как однородное капиллярно-пористое тело с равномерным распределением влаги, с вертикальной направленностью капилляров (процесс изотермический).

С. В. Нерпин и А. Ф. Чудновский (1975) исследовали также вопрос об интенсивности испарения для многоступенчатых структур, когда среда состоит из капилляров различных размеров (мелких и крупных). В частности, они показали, что для почв определенной структуры теоретические и экспериментальные зависимости относительной интенсивности испарения от средней влажности для капиллярной модели дают удовлетворительное совпадение.

Однако, естественно, для многих реальных почв с произвольным распределением капилляров зависимости испарения, например, как функции влажности, могут иметь различный вид, исходя из параметров среды.

Поэтому для аналитического решения задач влагосолепереноса часто приходится устанавливать вид функциональной связи между различными физическими величинами, полученными на основе эксперимента в определенном интервале времени и пространства для прогнозирования изменения различных характеристик протекающего процесса вне этого интервала*. Например, функциональная связь $\bar{\delta} = f\left(\frac{W - W_{вз}}{W_{ппв} - W_{вз}}\right)$ в пределах точности эксперимента описывается в виде следующей экспоненциальной зависимости (рис. 15):

$$\bar{\delta}(\xi) = 0{,}0043\,(e^{5{,}3\xi} - 1), \tag{52}$$

где $\xi = \frac{W - W_{вз}}{W_{ппв} - W_{вз}}$.

Принимая, что испарение с поверхности почвы пропорционально интенсивности водоотдачи за некоторый конечный промежуток времени, записываем

$$E_n(t) = A\,(e^{5{,}3\xi} - 1). \tag{53}$$

Под действием теплового потока при $\xi < 1$ осредненный капиллярный фронт перемещается вниз на глубину h_i. Вследствие уменьшения температуры в зависимости от глубины зоны аэрации интенсивность испарения падает. Считая, что интенсивность испарения линейно падает с глубиной, можно написать

$$E_n(z, t) = A\,(e^{5{,}3\xi} - 1)\,(1 - Bz) \quad 0 \geqslant z \leqslant h_i,$$

где A и B — некоторые константы.

Ранее уже показано, что испарение непосредственно сразу же не снижает уровень грунтовых вод. Первоначально оно расходует запасы влаги из почвы до тех пор, пока фронт испаряющейся влаги за время $t_к$ не переме-

---

* При реализации математической модели на ЭВМ достаточно во многих случаях использовать только таблицу экспериментальных данных.

стится до такого состояния капиллярной каймы, обусловленной уровнем грунтовых вод, при котором интенсивность капиллярного подсоса $S=f(h_k)$ не уравновесится интенсивностью суммарного испарения.

Транспирация влаги корнями растений при такой схеме вносит значительное усложнение в исследования, особенно при пропашных культурах (хлопок). С. Ф. Аверьянов, А. И. Голованов и Ю. Н. Никольский (1974) в последнее время предложили для определения транспирации выражение

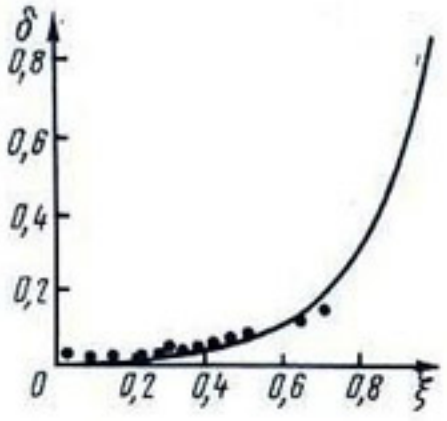


Рис. 15. График функциональной связи интенсивности водоотдачи от влажности почвы для грунтов Голодной степи при влажности завядания 7% и предельной полевой влагоемкости 29,5%.

$$E_p = E_{p_0} \frac{W - W_{\text{вз}}}{W_{\text{пв}} - W_{\text{вз}}} \int_{z_{t_0}}^{z_i} \left(\frac{W - W_{\text{вз}}}{W_{\text{ппв}} - W_{\text{вз}}} d_2 \right)^{-1} dz.$$

Однако оно учитывает только глубину корнеобитаемой зоны и не учитывает фактическое распределение корней в активной зоне. Поэтому будем считать, как У. С. Роулинз и П. Раатс, что интенсивность транспирации влаги корнями при насыщенном почвогрунте распределена в первом приближении соответственно распространению общей массы корней по глубине. При влаге, отличной от $W_{\text{ппв}}$, интенсивность транспирации снижается так же, как интенсивность водоотдачи почвогрунтов, по экспоненте.

Известно, что оптимальное водопотребление, близкое к потенциальной эвапотранспирации, соответствует состоянию, когда $\approx 15\%$ корней находится в зоне аэрации. Для каждого растения и определенного периода времени потенциальную транспирацию E_{p_0} можно определить как функцию активной радиации R и стадии развития растений, соответствующую состоянию, при котором 15% массы корней (m_z) находится в зоне аэрации, а остальные — в зоне влажности, равной или больше предельной полевой влажности. Тогда потенциальная транспирация может быть представлена как

$$E_{p_0}(t) = f(R; F_л) = 0{,}85\delta_0 \int_0^{z_0} m_z(z)\, dz, \qquad (54)$$

где $F_л$ — общая площадь листовой поверхности; δ_0 — интенсивность водоотдачи почвы при $W_{ППВ}$; z_0 — глубина корневой зоны.

При влажности ниже ППВ и при незначительной доле массы корней в почве с учетом закона изменения интенсивности водоотдачи почв можно написать

$$E_p(t, W) = E_{p_0} \frac{n_r}{0{,}85} \left(e^{5{,}3 \frac{<W> - W}{W_{ППВ} - W_{ВЗ}}} - 1 \right), \qquad (55)$$

где $<W>$ — средняя влажность в пределах корнеобитаемого слоя; h_r — доля корневой массы, лежащей в увлажненной зоне.

Зная закон изменения массы корней при разных способах полива и различной минерализации грунтовых вод, влажность почвогрунтов и потенциальную транспирацию, можно найти фактическую транспирацию и испарение для каждой фазы развития растений, соответствующие концу полива.

Тогда период $t_{0i} \leqslant t \leqslant t_{кi}$ должен быть определен из выражения (53) с учетом интенсивности испарения, близкой в этот период к $E_{p_0}(t)$, в слое от верха капиллярной каймы до поверхности земли. С учетом массы корней, расположенных выше капиллярной каймы, имеем

$$\int_0^{z_1 - h_к} \Delta W_i dz = \int_{t_{0i}}^{t_{кi}} E_п(t)\, dt + \frac{m_z - n_z}{m_z} \int_{t_{0i}}^{t_{кi}} E_{p_0}(t)\, dt, \qquad (56)$$

где $\frac{m_z - n_z}{m_z}$ — доля общей массы корней, лежащих выше зоны капиллярной каймы.

Общее же изменение уровня грунтовых вод за межполивной период будет происходить, как говорилось выше, под действием трех факторов: дренажного стока, растекания и эвапотранспирации. Тогда

$$\int_{t_{кi}}^{t_{дi}} q_д\, dt + \frac{m_z - n_z}{m_z} \int_{t_{кi}}^{t_{дi}} U_p dt + \int_{t_{кi}}^{t_{дi}} (E_п + E_p)\, dt = \mu (h_{к_1} - h_0). \qquad (57)$$

Первый интеграл зависит от напора над дреной, создаваемого уровнем грунтовых вод, и от гидрогеологических условий; второй определяется скоростью снижения уровня грунтовых вод под действием испарения и транспирации, то есть зависит от испаряемости, климатических условий и водно-физических свойств почвы, характерных для данной местности; наконец, интенсивность растекания (третий интеграл) есть функция взаимодействия техники полива, положения дренажа и уровня грунтовых вод.

Наблюдения авторов в натурных условиях показали, что в разные периоды интенсивность действия трех указанных составляющих различна: в первый полив определяющая величина — растекание фильтрационного бугра; во второй — растекание, испарение и частично дренаж; в третий и последующий поливы — в основном дренаж.

В первом приближении для каждого значения h_{κ_i} в каждый момент t_i после прекращения полива можно найти значения $q_{д_i} = f(h_{\kappa_i})$; $(E_n + E_p) = f(h_{\kappa_i})$ и $U_p = f(h_{\kappa_i})$, используя формулы установившегося режима фильтрации.

Однако такой подход дает значительные погрешности в определении дренажного стока.

В данной главе были рассмотрены особенности работы дренажа в наиболее сложном по методике расчета эксплуатационном периоде. Работа дренажа в мелиоративный период в процессе промывок будет изложена в главе 7.

Остановимся теперь на закономерностях солепереноса на фоне горизонтального дренажа.

Солеперенос на фоне горизонтального дренажа в эксплуатационный период

Движение солей в почве происходит вследствие перемещения их с растворами конвективным способом и диффузионным за счет разности концентрации. Конвективный перенос солей в растворах происходит при движении минерализованных грунтовых вод, изменении их уровня, при подаче оросительной воды в почву, инфильтрации осадков и др. Существенное влияние на солеперенос в почве оказывают процессы сорбции.

Закономерности солепереноса в почве установлены на основе предположений о равномерном характере ее пористой структуры. Здесь поток диффузии определяется коэффициентом молекулярной диффузии D_0 и градиентом концентраций C:

$$j = -D_0 \vec{\nabla} C,$$

а саму величину D_0 часто выбирают в виде экспоненциальной зависимости от влажности

$$D_0 = \alpha \exp(\beta W),$$

где α и β — экспериментальные константы ($\beta \approx 10$; $\alpha = 0{,}001 \div 0{,}005$).

Известен ряд решений, описывающих движение солей в почве, например решения Н. Н. Веригина, В. М. Шестакова, Д. Ф. Шульгина, С. В. Нерпина и др. Все они построены на замкнутой системе дифференциальных уравнений, описывающих энергомассоперенос в пористых средах.

Для одномерного случая при $v_x = v = \text{const}$ и $D_x = D = \text{const}$ получается уравнение:

$$m \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial t}. \qquad (58)$$

Оно часто используется для расчета объема промывной нормы засоленных почв. При этом законы растворения солей в твердой фазе должны определяться экспериментально.

Часто полагают, например,

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma (C - C_0), \qquad (59)$$

где γ — константа растворения; C — концентрация солей предельно насыщенного раствора.

Формула (59) представляет собой изотерму сорбции Генри.

В случае промывки сильнозасоленных почв концентрация раствора может достигать предельного насыщения, что приводит к изменению скорости фильтрации. В. И. Пеньковский и В. А. Постнов предложили учитывать зависимость скорости фильтрации от плотности и вязкости раствора. Уравнения процесса промывки почвы для одномерного случая даны в виде

$$\left.\begin{aligned} v(x;\,C;\,t) &= -\frac{K}{\mu(C)}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{K\rho(C)}{\mu(C)}g - \\ -\frac{\partial(vC)}{\partial x} &+ j\delta(C_* - C) = m\frac{\partial C}{\partial t}; \\ \frac{dv}{dx} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial C}\frac{dC}{dx} = 0, \end{aligned}\right\} \quad (60)$$

где $v(x;\ C;\ t)$ — скорость движения раствора концентрации C; K; m — проницаемость и пористость грунта; $p(x;\ t)$ — давление в растворе; j — коэффициент солеобмена, характеризующий скорость растворения солей; C_* — концентрация полностью насыщенного солями водного раствора.

При этом $\mu(C)$ и $\rho(C)$ принимались в виде

$$\mu(C) = \mu_0 + \beta C;\ \rho(C) = \rho_0 + \alpha C,$$

где α и β определялись путем подбора.

Для устойчивого засоления (или рассоления) почвы при малом содержании солей в твердой фазе можно использовать уравнение ($D \neq \text{const}$):

$$\frac{d}{dx}\left(D\frac{dC}{dx}\right) + \frac{\partial(vC)}{\partial x} = 0. \quad (61)$$

Уравнения (58) и (61) описывают движение солей в грунтовых водах при полном насыщении. Предполагается, что поровое пространство грунта моногенно.

Дифференциальное уравнение переноса солей с учетом гетерогенности порового пространства при наличии сквозных и тупиковых пор имеет вид

$$\left.\begin{aligned} m\varkappa\frac{\partial C}{\partial t} + vm\varkappa\frac{\partial C}{\partial x} + m(1-\varkappa)\frac{\partial N}{\partial t} &= Dm\varkappa\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \alpha(C - N), \end{aligned}\right\} \quad (62)$$

где C; N — объемные концентрации солей внутри каждого из компонентов; $\varkappa m$ — доля сквозных пор; $(1-\varkappa)m$ — доля тупиковых пор; α — параметр.

При определенных начальных и граничных условиях решение задачи такого вида дали М. Б. Баклушин, Л. М. Рекс и И. Б. Хлебникова (1972). В зоне аэрации (в области неполного насыщения) фильтрация имеет ряд особенностей, которые не могут не отразиться на процессе солепереноса.

В последние годы были сделаны попытки математического описания движения солей в почвогрунте при неполном насыщении. Здесь также принимается предположение о том, что при одновременном переносе растворенных веществ и влаги процесс управляется конвекцией и диффузией. Причем диффузия солей в почве описывается первым законом Фика.

Выражения для компонентов весовой скорости переноса солей в зоне аэрации записываются в виде (одномерный случай)

$$U_z = qC - D(v; W)\frac{dC}{dz}$$

или, учитывая, что

$$q = Wv \text{ и } D = (v; W) = D_n(v) + D_p(W),$$

получаем

$$U_z = vW_c - [D_n(v) + D_p(W)]\frac{dC}{dz}.$$

Составляя уравнение баланса бесконечно малого элемента неполностью насыщенной среды, приходим к следующему уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial t}(N + W_c) = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(v; W)\frac{\partial C}{\partial z}\right] = \frac{\partial(qC)}{\partial z} + S, \quad (63)$$

где N — количество солей, содержащихся в твердой фазе; q — поток раствора, определяемый из соотношения $q = Wv$; C — концентрация солей в жидкости; S — источник (или сток) солей.

Для случая, когда соли не взаимодействуют с почвой (инертные соли) и отсутствуют источники и стоки, получаем уравнение

$$\frac{\partial(WC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(v; W)\frac{\partial C}{\partial z} - qC\right]. \quad (64)$$

Оно предполагает процесс изотермическим. Входящие в него величины W, v, q получаются в результате решения уравнения влагопереноса:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(W)\frac{\partial W}{\partial z}\right] - \frac{\partial K(W)}{\partial z}$$

при соответствующих условиях.

Найдя W, определяем

$$q = vW = K(W) - D(W)\frac{\partial W}{\partial z},$$

а v определяется из соотношения $v = \frac{q}{W}$. Подставив найденные значения в уравнение (64) и решая его при соответствующих условиях, получаем распределение солей в зоне аэрации.

При движении влаги и солей в зоне аэрации при неизотермических условиях следует учитывать температурный градиент, который создает дополнительно тепловой поток влаги и солей.

Определение закономерностей солепереноса методом физико-химической гидродинамики затрудняется большим разбросом значений коэффициента конвективной диффузии D, находимых в полевых экспериментах. Поэтому при исследовании процессов, происходящих в почвогрунтах, за коэффициент D принимают некоторое среднее значение. Причем этот коэффициент выбирают таким образом, чтобы математическая модель, используемая для прогнозирования процессов солепереноса на некоторые моменты времени, с определенной точностью давала совпадающие результаты с данными эксперимента на те же моменты времени. Часто вместо параметра D находят безразмерный параметр Пекле $\mathrm{Pe} = \frac{Vl}{D}$.

Исследования по определению параметров солепереноса были проведены в САНИИРИ Р. В. Савельевой. В этом же направлении работы проводили М. Б. Баклушин, Л. М. Рекс, В. А. Барон.

Например, формула для расчета параметра Пекле (Р. В. Савельева) имеет вид

$$\mathrm{Pe} = \frac{0{,}5}{\left(1 - \frac{1}{\bar{v}}\right)(z-1)} \ln \frac{\frac{\bar{C}}{\bar{v}-1} - \bar{C}_2}{\frac{\bar{C}}{\bar{v}-1} - 1}, \qquad (65)$$

где $\bar{C} = C_0/C$; $\bar{C}_2 = C_0/C_1$; $\bar{v} = v/v_0$; $\bar{z} = z_2/z_1$; v_0 — среднегодовое питание грунтовых вод (м/сут) и C_0 — их минерализация, г/л; v — среднегодовая скорость испарения с поверхности почвы; z_1 — среднегодовая глубина грунтовых вод; z_2 — глубина расчетного слоя от поверхности, м; C — засоленность почвы; C_1 — минерализация грунтовых вод у поверхности, г/л; $\bar{C}_2$ — минерализация порового раствора.

Некоторые работы САНИИРИ показали, что, используя решение уравнения массопереноса Фика при определенных начальных и граничных условиях и выражение

(57), можно решить ряд практических задач (Р. В. Савельева):

прогнозный расчет динамики распределения солей в зоне аэрации за вегетацию;

расчет изменения минерализации грунтовых вод при орошении;

расчет солевого режима при заданном режиме орошения;

ориентировочный расчет режима орошения при заданном солевом режиме.

Среднее содержание солей в зоне аэрации $n_{ср}$ (% массы), сухого грунта в зависимости от числа Пекле в поливной и межполивной периоды изображены на рисунке 16, где $t_1 = m_{ij}/\bar{x}_j\mu$ (m_{ij} — поливная норма i-го полива, в метрах слоя воды; $\bar{x}_j$ — уровень грунтовых вод после j-го межполивного периода); $\bar{n}_{ср} = n_{ср}/\bar{n}$ ($n_{ср}$ — минерализация оросительной воды; $\bar{n}$ — то же, грунтовой воды). Причем здесь начальное распределение солей в зоне аэрации соответствует установившемуся режиму, для которого имеется решение, полученное С. Ф. Аверьяновым.

Зная параметр Pe, легко определить коэффициент молекулярной диффузии.

$$D = \frac{V}{2\mu\,\mathrm{Pe}}. \tag{66}$$

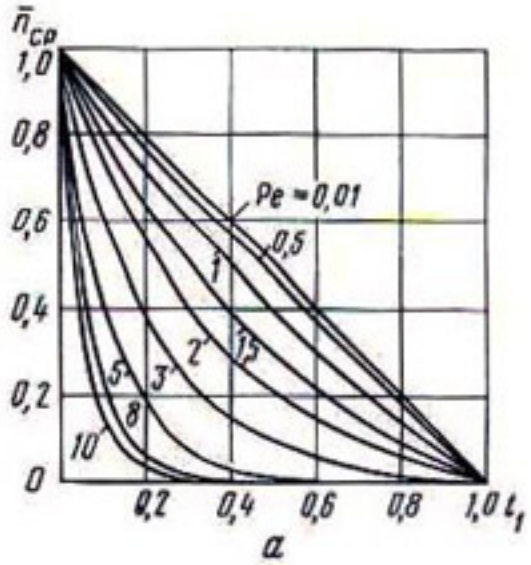
Перед поливом минерализацию почвенного раствора определяли по формуле:

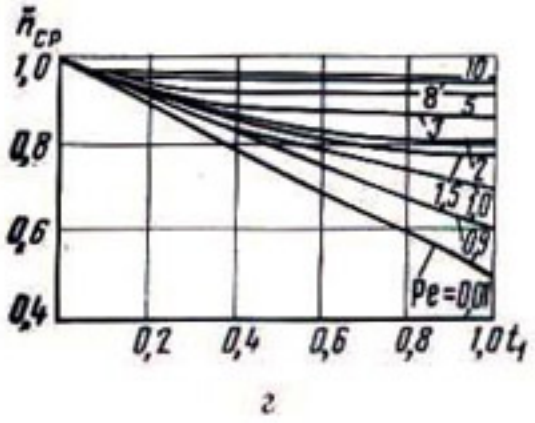
$$\bar{n}_1 = \frac{\bar{n}_{ср}}{1-\bar{v}_*} + \left(1 - \frac{\bar{n}_{ср}}{1-\bar{v}_*}\right) e^{-2\mathrm{Pe}\,(1-\bar{x})} \quad (t=0),$$

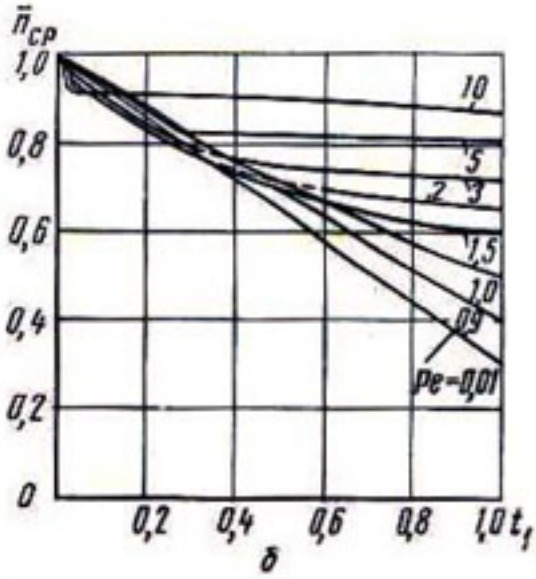
где $\bar{v}_* = v_2/v_1$ (v_1 — интенсивность инфильтрации, v_2 — интенсивность испарения); $\bar{x}$ — положение уровня грунтовых вод в исходном состоянии.

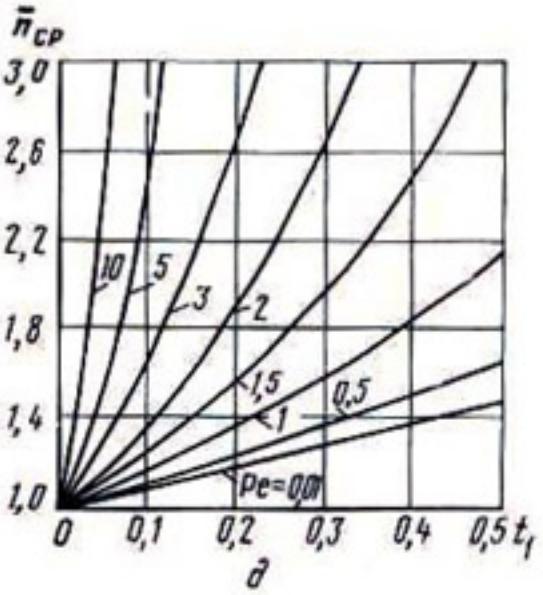
На верхней границе было принято известное условие Бреннера, а на нижней — концентрация раствора совпадала с минерализацией грунтовых вод.

Параметр Пекле не является постоянным. В процессе освоения земель в мелиоративном плане за счет вымыва солей, содержащихся в твердой фазе, изменяется пористость среды. Следовательно, изменяется и скорость фильтрации. Однако, анализируя изменения параметра Пекле в процессе освоения земель Джизакской и Голод-









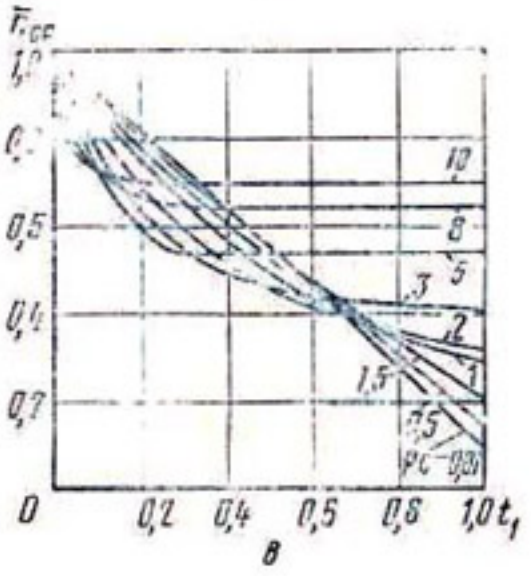


Рис. 16. Расчет солевого режима при орошении (по Р. В. Савельевой):

а — для поливного периода при $n_{ср}=1$; *б* — то же, при $n_{ср}=0{,}1$; *в* — то же, при $n_{ср}=0{,}3$; *г* — то же, при $n_{ср}=0{,}5$; *д* — для межполивного периода.

ной степей, В. Ф. Сафонов и Р. П. Паренчик (табл. 4) установили, что он зависит в основном от динамики и мало — от характера засоления.

Расчет велся по токсичным, легко подвижным ионам Cl^-, явлениями сорбции пренебрегали.

Таблица 4. **Значения параметра $Pe_0=Pe/x$ в процессе освоения земель** (по данным В. Ф. Сафонова и Р. П. Паренчик), 1/м

Участок	1971 г.	1972 г.		1973 г.	1974 г.	1975 г.
		весна	осень			
Джизакская степь, совхоз № 4	0,148 / 0,169	0,285 / 0,361	0,275 / 0,270	0,251 / 0,248	0,242 / 0,235	0,221 / 0,213
Голодная степь, совхоз № 8			0,224 / 0,251			
Голодная степь, совхоз № 5		0,066 / 0,078	0,083 / 0,067			

Примечание. Числитель — по Na^+, знаменатель — по Cl^-.

В зависимости от формы начальной эпюры засоления как функции координат и времени Л. М. Рекс получил решение по определению концентрации солей:

$$\left.\begin{aligned} C &= C_n + 0{,}5\left[(C_0 - C_n)\,F(az_0) + \right.\right. \\ &\left.\left. + \sum_{j=0}^{\kappa} (C_{j+1} - C_j)\,F(az_{j+1})\right], \\ F(az_j) &= \operatorname{erfc}(az_j) + [\operatorname{erfc}(az_j^+) - \\ &- \operatorname{diefrc}(az_j^+)\exp(4a^2z), \\ a &= \frac{v}{2}\sqrt{\frac{t}{D^*}};\ z_j = 1 + h_j \pm z; \\ h_j^0 &= \frac{h_j}{vt};\ h_0 = 0;\ z = \frac{x}{vt};\ v = \frac{v_0}{m}, \end{aligned}\right\} \quad (67)$$

где κ — число горизонтов отбора проб почвогрунтов; C_j — содержание солей в j-ом горизонте, г/л; h_j — расстояние от поверхности земли до горизонта, м; C_n — минерализация промывной доли воды, г/л; C — содержание солей (г/л) в точке x почвогрунта во время t, сут; t — продолжительность движения воды по поровому пространству; v_0 — скорость фильтрации, м/сут.

В результате можно найти такую промывную долю, которая позволит создать заданную концентрацию солей

в насыщенной среде при смене поливов и межполивных периодов.

Здесь принимается главное допущение о замене переменных скоростей фильтрации и испарения на осредненные.

Водно-солевые балансы и выбор оптимального мелиоративного режима

Крайне важно постоянно представлять и прогнозировать те изменения в водно-солевых балансах, которые под действием естественных и искусственных управляемых факторов должны обеспечивать оптимальные условия для развития растений и повышения плодородия почв.

Под естественными факторами (рис. 8) следует понимать подземный приток-отток грунтовых вод, осадки, испарение из зоны аэрации и грунтовых вод, транспирацию и поверхностный приток-отток вод.

Искусственных факторов, управляемых с помощью инженерных сооружений, в основном имеется два: орошение и дренаж. При этом орошением и дренажем изменяем не только объем водоподачи и оттока, но и положение уровня грунтовых вод, который, в свою очередь, существенно влияет на испарение, транспирацию и подземный приток-отток грунтовых вод.

Здесь не выделяем отдельные способы формирования грунтовых вод (инфильтрация из рек, фильтрационные потери), но должны всегда учитывать схему и объем их воздействия. Отметим только, что Д. М. Кац в работах по типам режимов грунтовых вод в зависимости от различных удельных весов приходных статей подразделяет генетические типы питания в орошаемых районах и обобщает типичные графики колебания их в течение года.

Создание надежного и экономичного дренажа обеспечивает определенный фон, но не может само по себе решить задачу борьбы с засолением. Известны многочисленные примеры, когда дренированные земли, на которых не проводят сельскохозяйственные работы, продолжают интенсивно засоляться. Для обеспечения рассоления необходимо, чтобы на фоне дренажа осуществлялись промывки и промывной режим орошения, то есть создавался необходимый мелиоративный режим сочетанием дренажа, водоподачи и агротехники.

Это сочетание определяет взаимодействие оросительных и грунтовых вод и влияет на суммарное водопотребление.

Опыт орошения засоленных земель в СССР, в частности в Средней Азии, показывает, что земли можно рассолить при любом уровне грунтовых вод, но за счет различных расходов оросительной воды. Так, неглубокий дренаж при уровне залегания грунтовых вод около 1,5 м в Хорезмской и Ташаузской областях обеспечивает постоянное снижение того сезонного соленакопления, которое создается здесь. Расход нетто оросительной воды колеблется от 12 тыс. до 14 тыс. м³/га. Здесь же при заглублении дренажа до 2,8 м, уровне грунтовых вод до 2,2—2,5 м на опытных участках суммарное водопотребление нетто снижено до 9—10 тыс. м³/га.

И. Бауманс, В. Хулсболс и другие, проводя опыты в Иране на фоне дренажа глубиной 1,2 м с междреньем 25 м в районе Даджалах, получили опреснительный режим при затратах воды на орошение 16—17 тыс. м³/га.

М. М. Эль-Габали в ОАР на тяжелых грунтах массивов Абис, Итку при очень густом дренаже глубиной 0,9 м и междреньях 20 м при промывках нормами 30—34 тыс м³/га не добился рассоления и пришел к выводу о необходимости заглубления дренажа и уровня грунтовых вод.

При снижении соленакопления в активном слое почвогрунтов надо исходить из минимума общих затрат воды на орошение.

Известно, что необходимое водопотребление на орошение определяется в результате рассмотрения водного баланса орошаемого массива:

$$(E_p + E_m) - \text{Ос} \pm (\underline{\text{П}} - \underline{\text{О}}) \pm (W_0 - W_к) + \text{М} = \text{Ор}, \quad (68)$$

где $\pm\underline{\text{П}}—\underline{\text{О}}$ — приток-отток грунтовых вод в зону аэрации; $W_0—W_к$ — изменение запасов влаги в почве; М — промывная доля.

Из рисунка 6, *а* видно, что оросительную подачу за период какого-либо полива Δtn можно разделить на часть, идущую на изменение запасов влаги в зоне аэрации ΔW_i, и на часть, инфильтрующуюся в грунтовые воды и дренаж $\bar{E}_i$, которая соответствует так называемой промывной доле LR. Оросительная вода с минерализацией $C_{\text{ор}}$ под действием инфильтрации сквозь толщу аэрации обогащается солями до минерализации, равной дренаж-

ной (или даже грунтовой) воде. Поэтому условия предотвращения соленакопления с целым рядом упрощений и допущений сводятся к элементарной форме, соответствующей методике лаборатории засоления США:

$$(Op - M)\, C_{op} \leqslant MC_{др}. \qquad (69)$$

Отсюда

$$M \geqslant \frac{OpC_{op}}{C_{др} + C_{op}}.$$

Это положение, конечно, очень приближенно, и оно не учитывает всего баланса солей орошаемого массива, который можно представить следующим образом:

$$\Delta S = Oc\, C_{oc} + OpC_{op} \pm (\underline{П} - \underline{О})C_{гр} - DC_{др} - Q_{сбр}C_{сбр} - S_{ур}, \qquad (70)$$

где ΔS — изменение запасов солей; C_{oc}; C_{op}; $C_{др}$; $C_{сбр}$ — соответственно минерализация осадков, оросительных, дренажных и сбросных вод; $S_{ур}$ — вынос солей с урожаем или биологический дренаж.

Здесь все величины понятны, остановимся лишь на биологическом дренаже. Возможность существенно влиять на уровень грунтовых вод с помощью растительности, особенно древесной, известна из работ С. А. Кудрина, В. М. Легостаева и др. Р. А. Гейнц, Г. В. Еременко и А. У. Усманов (1973) установили, что вынос солей растениями в условиях Ферганской долины составляет от 2,1 до 5,3% общего прихода (расхода) солей.

Учитывая, что M связано с количеством солей ΔS, накапливающихся в процессе орошения ($MC_{др} \geqslant \Delta S$), можно написать:

$$M = \frac{\Delta S}{C_{др}}.$$

Совместное решение на этом основании уравнений водного и солевого баланса (68) и (70) для различных исходных составляющих — основа определения оптимальных мелиоративных режимов.

Под оптимальным мелиоративным режимом понимается такое сочетание орошения и дренажа, при котором рассоление и постоянное нарастание естественного плодородия орошаемых земель обеспечивается при минимальных затратах оросительной воды на единицу урожая.

Понятие о мелиоративных режимах было введено в СССР в 1962 г. Н. М. Решеткиной. Они создаются комплексом гидротехнических и агротехнических меро-

приятий с учетом природных условий и экономической целесообразности соответственно классификации почвообразующих процессов. Позже это понятие поддерживал и развил вместе с Н. М. Решеткиной А. А. Рачинский. Однако в дальнейшем А. А. Рачинский возможные режимы стал делить на три: сероземный, сероземно-луговой и луговой. В то же время он считает, что третий режим нельзя отнести к оптимальным.

Методику установления параметров мелиоративных режимов на основе анализа водного и солевого балансов и ряда теоретических положений С. Ф. Аверьянова предложил Л. М. Рекс (1975). Однако он сделал ряд допущений: хроноизоплеты влажности параллельны уровню грунтовых вод во времени, сработка уровня грунтовых вод в неустановившемся режиме учитывает дренажный сток, рассчитанный по формулам установившегося режима, приводящий к неточности решения.

Установлением параметров оптимального мелиоративного режима занимался, например, А. И. Голованов. Он сделал вывод, что для большинства склонных к засолению районов оптимальным режимом является полуавтоморфный. Среднегодовую глубину грунтовых вод он рекомендует принимать равной $(0{,}9 \div 1{,}0)\ h_к$, что несколько меньше приводимой авторами.

Несколько иную методику при дренировании земель горизонтальным дренажем разработали И. П. Айдаров и Э. К. Каримов (1974). Они считают, что мелиоративный режим должен обеспечивать минимальный влагообмен с грунтовыми водами, который создается при глубинах грунтовых вод в пределах $(0{,}8 \div 1{,}5)\ h_к$, где $h_к$ — высота капиллярного поднятия. Оптимизация параметров мелиоративного режима проведена ими с использованием технико-экономических показателей по критерию приведенных затрат с учетом стоимости орошения. Считая такую постановку исключительно правильной, необходимо указать, что единственный ее недостаток — недоучет стоимости воды, меняющийся во времени. Так, в 1960 г. стоимость формирования 1 м^3 воды в бассейне р. Сырдарьи составляла по капитальным вложениям 6,5 коп., а к концу 1975 г. она возросла до 18 коп., а в 1980 г. достигнет 35—40 коп. Это значит, что экономия 1000 м^3/га воды эквивалентна капитальным вложениям 350—400 руб/га, что уже почти равно стоимости дренирования земель горизонтальным закрытым дренажем.

Исходя из этих положений, авторы считают необходимым производить оптимизацию мелиоративных режимов по минимуму суммарного расходования воды на гектар.

В таблице 5 приведены основные характеристики мелиоративных режимов.

Таблица 5. **Основные характеристики мелиоративных режимов**

Мелиоративный режим	Характер взаимодействия с грунтовыми водами	Питание из грунтовых вод и мелиоративная доля, тыс. м³/га	Испарение из грунтовых вод, тыс. м³/га
Автоморфный	Грунтовые воды не подпитывают оросительную влагу, инфильтрация идет свободно вниз	$+П \leqslant 0{,}05 \div 0{,}10\Sigma(E_р + E_т) - Oc$; $M = 0$	0
Полуавтоморфный	Грунтовые воды подпитывают инфильтрацию оросительной воды, но сами незначительно участвуют в питании растений	$-П \leqslant 0{,}1 \div 0{,}2\Sigma(E_р + E_т) - Oc$; $M = 0{,}5 \div 1{,}0$	0—1,5
Полугидроморфный	Грунтовые воды активно участвуют в питании растений, преобладая над оросительной влагой	$-П \geqslant 0{,}3\Sigma(E_р + E_т) - Oc$; $M \geqslant 2{,}0$	1,5—3
Гидроморфный	Питание растений в основном происходит за счет грунтовых вод	$-П \geqslant \Sigma(E_р + E_т) - Oc$; $M \geqslant 5{,}0$	3—7

Характерные особенности мелиоративных режимов становятся ясны из определения суммарных затрат нетто на орошение:

$$Op = \Sigma(E_р + E_т) - Oc \pm П \pm W + M. \qquad (71)$$

Дефицит увлажнения $\Sigma(E_р + E_т) - Oc$ является для данной местности и данной культуры относительно стабильным и зависящим в основном от климатических условий (активность радиации, количество осадков, интенсивность ветров, температурный режим) и свойств поч-

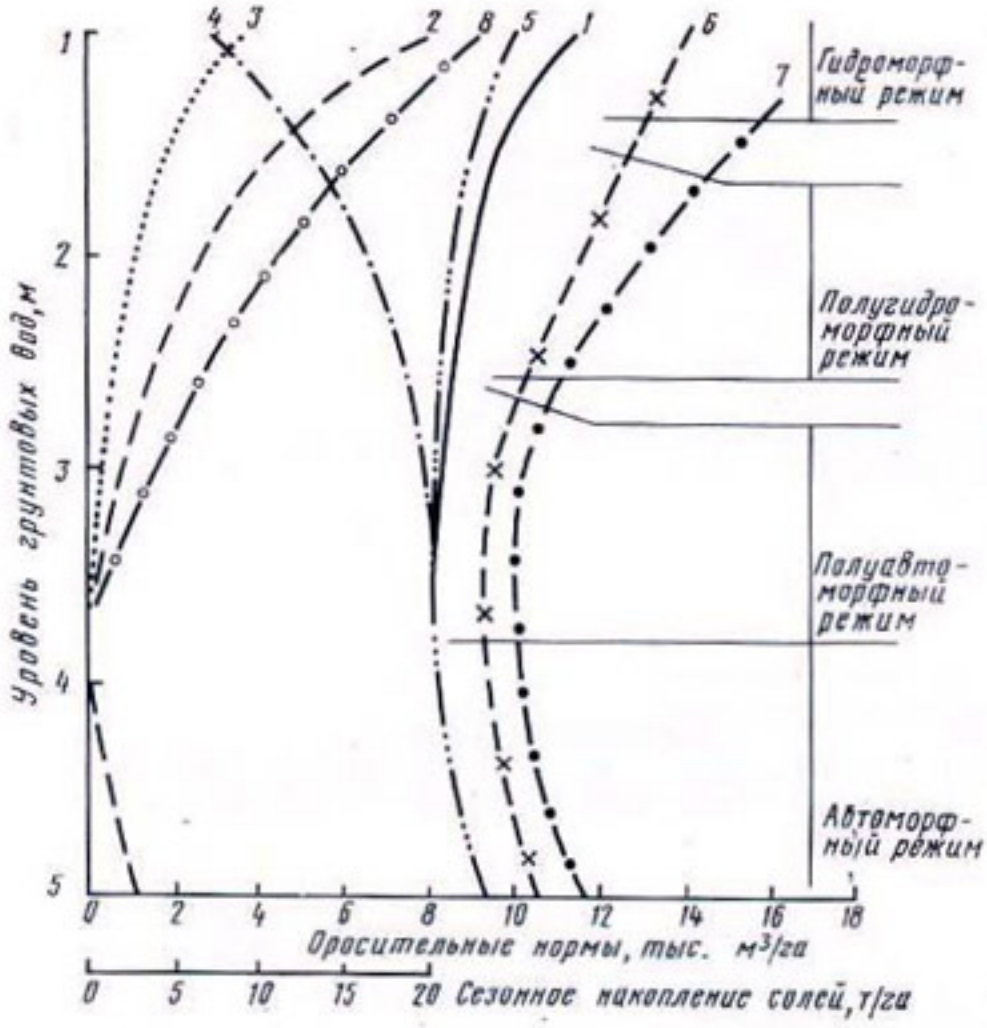


Рис. 17. Сравнительные зависимости оросительных норм, суммарного водопотребления и сезонного соленакопления для различных мелиоративных режимов:

1 — суммарное водопотребление минус осадки (Голодная степь); *2* — обмен с грунтовыми водами (Голодная степь); *3* — доля испарения из грунтовых вод, участвующая в соленакоплении (Голодная степь); *4* — оросительная норма вегетационного периода (Голодная степь); *5* — суммарная оросительная норма (Голодная степь); *6* — то же, для Каршинской степи (И. П. Айдаров); *7* — то же, для Канибадамского массива (И. П. Айдаров, Э. К. Каримов); *8* — сезонное соленакопление (Голодная степь).

вогрунтов. Эта величина имеет минимум на определенной глубине, на которой испарения из грунтовых вод практически нет: $\Sigma[(E_р+E_т)—Ос]min$. По мере понижения уровня грунтовых вод эта величина возрастает (рис. 17, кривая *1*) и одновременно увеличивается доля питания из них (рис. 17, кривая *2*), что уменьшает необходимую долю оросительной водоподачи. В этом случае при максимально доступном для развития растений уровне грунтовых вод оросительная водоподача была бы минимальной. Этот уровень следовало бы назначать, исходя из высоты капиллярного подъема, обеспечивающей поддержание влаги в корневой зоне в пределах 70—90% ППВ.

При минерализованных водах с повышением испарения из грунтовых вод возрастает интенсивность соленакопления. Поэтому надо увеличивать мелиоративную долю водопотребления М. Ее следует определять, как необходимое количество воды, которое нужно добавить к оросительной воде, чтобы вымыть накапливающиеся в процессе подпитывания из грунтовых вод соли. В результате испарения из грунтовых вод с минерализацией $C_{г.в}$ в активном слое будет накоплено солей: $\Delta S_1 = C_{г.в}\Delta П$. Чтобы вымыть их, потребуется количество воды М, которое, по В. Р. Волобуеву, равно или больше

$$M \geqslant \alpha \lg \frac{S_n}{S_0} \geqslant \alpha \lg \left(1 + \frac{C_{г.в}П}{S_0}\right). \qquad (72)$$

Заменив S_0 допустимым солесодержанием в зоне аэрации для различных типов засоления и условий, получим для них количество воды, затрачиваемое на удаление солей, накопленных в результате испарения из грунтовых вод.

Для условий Средней Азии и других аридных зон получается, что гидроморфный и полугидроморфный режимы позволяют использовать дополнительное количество воды из грунтовых вод. Но накапливающиеся при этом соли требуют для своего вымыва большее количество воды, чем до этого удалось сэкономить.

На рисунке 17 показано сравнение различных мелиоративных режимов для Голодной степи, Каршинской степи и Канибадамского массива, исходя из минерализации грунтовых вод 6—8 г/л для эксплуатационного периода.

Получается, что для большинства районов, подверженных или склонных к засолению, наиболее выгоден с мелиоративной точки зрения полуавтоморфный режим. Гидроморфный и полугидроморфный режимы могут быть с успехом применены в условиях пресных напорных грунтовых вод, например в зоне затопляемых или ограждаемых первых террас рек. Автоморфный режим следует поддерживать на естественно дренируемых массивах, где возможно сохранить глубокий уровень грунтовых вод, например при дождевании, подпочвенном орошении с сочетанием вертикального дренажа.

Оптимальная глубина грунтовых вод зависит от интенсивности испарения, минерализации грунтовых вод, а также водно-физических свойств почвогрунтов. Здесь наряду с интенсивностью испарения и соленакопления дол-

жна учитываться интенсивность подъема и сработки уровня грунтовых вод.

Эта величина зависит от механического состава почв. По данным С. Н. Рыжова, для легких супесчаных почв Хорезма характерны быстрые водоотдача, подъем и спад уровня грунтовых вод при максимальной высоте капиллярного подъема до 1,2—1,3 м. Поэтому в период вегетации на этих землях необходимо поддерживать уровень грунтовых вод около 2 м с тем, чтобы обеспечить оптимальное водное питание растений, не опасаясь интенсивного соленакопления при достаточной дренированности.

В почвогрунтах же Голодной степи, отличающихся большой водоудерживающей способностью, уровень грунтовых вод может поддерживаться в течение вегетации на 2,5—3 м. Оптимальное же увлажнение будет распространяться по всей зоне аэрации в пределах, близких к капиллярной влагоемкости.

Исходя из характерных для данного района климатических (испарение), хозяйственных (состав культур и транспирация) и почвенно-мелиоративных (коэффициент фильтрации, капиллярные свойства почв, водные константы) условий, авторы разработали методику определения параметров мелиоративных режимов.

Рассмотрим динамику мелиоративных процессов для каждого режима. В общем случае для определения движения воды в ненасыщенных пористых средах с учетом неизотермического процесса воспользуемся уравнением неразрывности. Чтобы установить изменения запасов влаги в активном слое почвы, достаточно проинтегрировать уравнение неразрывности между границами корнеобитаемого слоя ($0 \leqslant z \leqslant \leqslant \delta$).

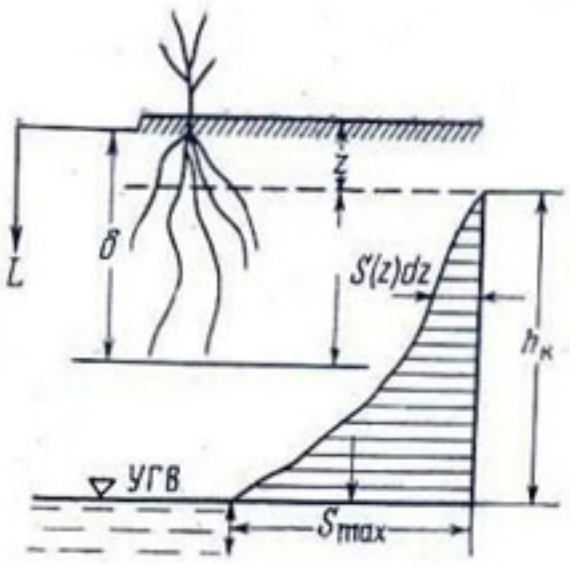


Рис. 18. Схема к расчету элементов водного баланса для различных мелиоративных режимов.

Если считать, что корневая зона со средней глубиной δ непрерывно заполняет некоторую область ω в плане, то задачу распределения влаги в почве можно считать одномерной. Таким образом, испарение, транспирация и другие характе-

ристики водного баланса за некоторый конечный промежуток времени t будут функцией координаты z.

Рассмотрим элемент dz, содержащий некоторую точку z, относящуюся к корневой зоне растений (рис. 18). Количество влаги dW, расходуемое на участке dz, определится соотношением

$$dW = q(z)\,dz + E_{\text{р}}(z)\,dz + E_{\text{т}}(z)\,dz. \qquad (73)$$

Уравнение (73) справедливо для $0 \leqslant z \leqslant \delta$. Поэтому, интегрируя это уравнение по z в пределах от 0 до δ, получаем

$$W = \int_0^{\delta} [q(z) + E_{\text{р}}(z) + E_{\text{т}}(z)]\,dz. \qquad (74)$$

Процесс водного питания растений во времени также является переменным, так как все его составляющие параметры δ, $E_{\text{р}}+E_{\text{т}}$ и h грунтовых вод — функция не только z, но и времени t. Для расчетов мелиоративного режима выбирали наиболее напряженный период водного питания растений, соответствующий максимальной ординате $E_{\text{р}}+E_{\text{т}}=f(t)$, принимая, что в рассматриваемом диапазоне он неизменен.

При гидроморфных условиях питание растений и испарение в период вегетации удовлетворяются в основном за счет капиллярного подсоса и питания из грунтовых вод. Оросительная влага может подаваться иногда в посевной период для влагозарядки самого верхнего слоя почвы и начального развития корневой системы.

Если пренебречь количеством влаги, содержащейся на участке $0 \leqslant z \leqslant z_{\text{к}}$, где $z_{\text{к}}$ — граница капиллярной каймы, то выражение (74), исходя из уравнения неразрывности, запишется в виде

$$\left.\begin{aligned} W &= \int_0^{\delta} [E_{\text{р}}(z) + E_{\text{т}}(z)]\,dz = \int_{z_{\text{к}}}^{\delta} [E_{\text{р}}(z) + E_{\text{т}}(z)]\,dz \\ &\int_{z_{\text{к}}}^{\delta} [E_{\text{р}}(z) + E_{\text{т}}(z)]\,dz = \int_{z_{\text{к}}}^{\delta} S(z)\,dz. \end{aligned}\right\} \qquad (75)$$

Учитывая, что при гидроморфном режиме все питание растений и испарение удовлетворяются за счет близко залегающих грунтовых вод, можно допустить, что при

этом условии суммарная эвапотранспирация равна потенциальной.

По данным советских и зарубежных ученых, потенциальная эвапотранспирация есть предельная эвапотранспирация для данной местности и данной культуры, характеризующая суммарное потребление при уровне грунтовых вод, близком к поверхности. Поэтому она мало зависит от колебаний естественных условий и является в основном функцией солнечной радиации, несколько скорректированной на адвекцию среды и тип возделываемой культуры. Фактическая эвапотранспирация в любом случае — лишь часть потенциальной $(E_р+E_т)_0$. В связи с этим водопотребление при гидроморфном режиме является максимальным и близким к $(E_р+E_т)_0$. Отсюда

$$\int_{z_к}^{\delta} S(z)\,dz = (E_р+E_т)_0, \tag{76}$$

где $(E_р+E_т)_0$ — потенциальная эвапотранспирация, выраженная в слое и соответствующая максимальной ординате суммарного испарения.

Для расчета глубины грунтовых вод, при которой достигается гидроморфный режим (его нижняя граница), необходимо установить зависимость всасывающей силы от свойств почвогрунтов. Наиболее простое решение дают исследования Я. Бенетина для определения распространения влаги в капиллярной зоне по высоте в зависимости от механического состава (содержание частиц $>0{,}01$ мм). Согласно этим работам, капиллярный подсос может быть выражен приближенно из $S_{max}=f(h_{кmax})$. Прямолинейная интерпретация этих кривых позволяет установить зависимость:

$$S_z = S_{max}\frac{\delta - z}{h_к}P_0;\ z_к \leqslant z \leqslant \delta. \tag{77}$$

Интегрируя уравнение (68) по z в пределах от $z_к$ до δ, получаем

$$\int_{z_к}^{\delta} S(z)\,dz = S_{max}\,\frac{P_0'}{2h_к}(z-z_к)^2\Big|_{z_к}^{\delta} = \frac{S_{max}P_0'(\delta - z_к)^2}{2h_к}.$$

Отсюда на основании формулы (67) следует, что

$$(E_р+E_т)_0 = \frac{S_{max}P_0'(\delta - z_к)^2}{2h_к}$$

или

$$(\delta - z_к)^2 = \frac{2h_к(E_р + E_т)_0}{S_{max}P_0'}.$$

Отсюда

$$z_к = \delta - \sqrt{\frac{2h_к(E_р+E_т)_0}{S_{max}P_0'}}, \qquad (78)$$

где P_0' — определяется как объем капиллярной скважности минус объем капиллярных пор и минус двойная максимальная гигроскопичность.

Для расчета скорости капиллярного подсоса целесообразнее, очевидно, пользоваться формулой, выведенной П. А. Летуновым (1955) на основе обобщения большого количества материалов отечественных (Н. И. Тулайков, Ф. Н. Саваренский, П. С. Косович) и зарубежных (Ф. Цункер, М. Зауербрей и др.) исследователей:

$$S(z) = \beta h_к^{\frac{1}{\beta}} z^{1-\frac{1}{\beta}} P_0', \qquad (79)$$

где β — показатель степени, теоретически, по данным Роде, Козени, Цункера и других, он равен 0,5, а фактически он изменяется от 0,104 (для песков) до 0,688 (для солонцов), среднее значение его составляет около 0,3.

Интегрируя уравнение (76) по z в пределах от $z_к$ до δ при $\beta \neq 0{,}5$, получаем

$$z_к = \left[\delta^{2-\frac{1}{\beta}} - \frac{(E_р+E_т)_0\left(2-\frac{1}{\beta}\right)}{\beta P_0' h_0^{\frac{1}{\beta}}} \right]^{\frac{\beta}{2\beta-1}} \qquad (80)$$

При $\beta = 0{,}5$

$$z_к = \delta \exp\left[\frac{2(E_р+E_т)_0}{P_0' h_k^2}\right]. \qquad (81)$$

Рассмотрим теперь составляющие водного питания при полугидроморфном режиме. Нижняя граница этого режима — уровень грунтовых вод, при котором оросительная вода составляет около трети всего водного питания.

Здесь важно учитывать характер изменения транспирации и испарения при изменении уровня грунтовых вод.

Как было показано ранее, эта зависимость может быть получена для каждого случая в виде

$$(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_z=(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_0 f(z).$$

Итак, такую зависимость для сечения, соответствующего нижней границе полугидроморфного режима, аналогично проделанным расчетам для гидроморфного режима, можем записать

$$-\int_0^{\delta} q(z)\,dz+\int_0^{\delta}[E_{\text{р}}(z)+E_{\text{т}}(z)]\,dz=\int_{z_к}^{\delta} S(z)\,dz. \qquad (82)$$

Если учесть, что $q(z)$ в интервале от 0 до δ есть не что иное, как оросительная водоподача (Ор — М) без промывной доли водопотребления, то

$$(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}\big|_{0\leqslant z\leqslant\delta}=\int_{z_к}^{\delta} S(z)dz+(\text{Ор}-\text{М}).$$

Приняв для полугидроморфного режима, что $^1/_3$ водоподачи удовлетворяется орошением, а остальная — за счет грунтовых вод, то есть

$$\frac{1}{3}(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}\Big|_{0\leqslant z\leqslant\delta}=(\text{Ор}-\text{М})$$

для нижней границы, по Я. Бенетину, получим

$$z_к=\delta-\sqrt{\frac{4h_к(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}}{3\,S_{\max}P_0'}}, \qquad (83)$$

а для верхней границы полугидроморфного режима

$$z_к=\delta-\sqrt{\frac{h_к(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}}{S_{\max}P_0}}. \qquad (84)$$

То же, по П. А. Летунову, при $\beta=^1/_2$ для нижней границы полугидроморфного режима

$$z_к=\delta_{\exp}\left[-\frac{4\,(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}}{3\,P_0'\,h_к^2}\right], \qquad (85)$$

а для верхней границы

$$z_к=\delta_{\exp}\left[-\frac{(E_{\text{р}}+E_{\text{т}})_{\text{пг}}}{3\,P_0\,h_к^2}\right]. \qquad (86)$$

Здесь два неизвестных: $z_к$ и $(E_р+E_т)_{пг}=f(z_к)$. Для их определения составляем второе уравнение, для которого можно воспользоваться данными наблюдений за $(E_р+E_т)=f(h_{г.в})$.

Решив их относительно всех неизвестных, получим граничные решения для полугидроморфного режима.

Аналогично для полуавтоморфного режима составляем те же уравнения, исходя из того, что грунтовые воды участвуют в питании растений незначительно: $\leqslant 0{,}1\,(E_р+E_т)$.

Отсюда система уравнений представляется следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} 0{,}1\,(E_р+E_т) &= \int_{z_к}^{\delta} S(z)\,dz, \\ (E_р+E_т)_z &= (E_р+E_т)_0\, f(h_{г.в}). \end{aligned}\right\} \qquad (87)$$

Для автоморфного режима решение упрощается, так как вся водоподача идет за счет оросительной воды, но объем $E_р+E_т$ должен быть увеличен на инфильтрационное питание грунтовых вод.

Исследованиями В. А. Духовного по Голодной степи для обычных способов бороздкового полива установлена зависимость увеличения оросительной водоподачи от уровня грунтовых вод в виде

$$\left.\begin{aligned} K &= \frac{M_{max}}{M_{опт}} = f(h_{г.в}), \\ K &\approx 0{,}645\,H^{0{,}234}. \end{aligned}\right\} \qquad (88)$$

Исходя из указанных выше выражений для каждой зоны, культуры и почвенно-мелиоративных условий, может быть построен ряд кривых типа

$$(E_р+E_т)=f(h_{г.в}),$$

$$П=\int_{z_к}^{l} S(z)\,dz=f(h_{г.в}),$$

$$Ор-М=f(h_{г.в}).$$

Зная теперь исходную минерализацию грунтовых вод, можно, пользуясь либо упрощенными расчетами по методике В. Р. Волобуева, как это показано ранее, либо

расчетом солевого режима на основе теории массопереноса (программы Л. М. Рекса, Р. В. Савельевой, С. В. Нерпина и др.), определить мелиоративную долю водопотребления и построить кривую $M=f(h_{г.в})$.

Имея четыре кривые, для каждых условий не трудно установить режим, при котором затраты оросительной воды, включая мелиоративную долю, будут минимальными.

Авторы эти расчеты провели для условий дренажа Голодной степи (рис. 17).

После определения оптимальных пределов параметров мелиоративных режимов необходимо задаться глубиной дренажа и рассчитать для середины междренья всю динамику орошения и дренажного стока, как это было показано выше.

При этом глубину дренажа в пределах оптимальных параметров необходимо выбирать, сопоставляя интенсивность сработки уровня грунтовых вод с темпами соленакопления.

При первоначальных расчетах дренажа вся сложность задачи состоит в вычислении исходного превышения $h'_к$ над дренажным рабочим уровнем.

Для полугидроморфного режима, когда не рекомендуется быстро снижать уровень грунтовых вод, так как их минерализация низкая, соленакопления опасаться нечего, и основная задача состоит в усилении питания из грунтовых вод в период вегетации. Здесь достаточно незначительное превышение уровня грунтовых вод над расчетным уровнем дренажа, чтобы непродуктивная трата оросительной воды была минимальной. При этом глубина грунтовых вод должна колебаться между пределами, установленными авторами при определении параметров полугидроморфного режима. В первом приближении для полугидроморфного режима может быть принята величина $h_к - h_{др}$. Далее необходимо просчитать весь режим грунтовых вод, поливов и испарения в течение вегетации и проверить соответствие расчетным параметрам полугидроморфного режима. Там, где сходимость удовлетворительная, можно оставить принятые параметры. В случае несоответствия результатов путем изменения $h_к$—$h_{др}$ добиваются выполнения расчетных положений.

При полуавтоморфном режиме, когда имеем дело в основном с минерализованными водами, задача состоит в том, чтобы сделать минимальным подсос солей в зону

аэрации. Исходя из этого, целесообразнее ускорить снижение уровня грунтовых вод, так как именно оно определяет интенсивность соленакопления. На фоне дренажа этого можно достичь увеличением напора над действующей глубиной дренажа. С этой целью разница между $h_{к\max}$ и $h_{др}$ должна быть (насколько возможно и целесообразно) большой. Если действующая глубина дренажа равна, например, 2,8—3,0 м, а уровень грунтовых вод во время полива поднимается до 1,5 м, действующий напор составит 1,3—1,5 м, что позволит быстро понизить грунтовые воды.

Основное условие при этом может быть сформулировано так: обеспечить такой суммарный дренажный сток за вегетацию, при котором вынос солей (при отсутствии напорного питания) был бы больше подсоса солей из грунтовых вод в зону аэрации и суммы солей, поступивших в зону аэрации с оросительной водой.

Иначе говоря:

$$\int_0^{t_к} (q_д C)dt \geqslant \int_0^{t_к} E_{г.в} C\, dt + Ор_{нт} C_0, \qquad (89)$$

где $Ор_{нт}$ — оросительная норма нетто за вегетацию.

Здесь растекание в балансе солей не участвует, так как соли при растекании только перераспределяются в грунтовых водах.

Если учесть, что в течение вегетации минерализация грунтовых вод изменяется незначительно и принять ее постоянной и равной дренажному стоку, то тогда

$$\int_0^{t_к} q_д dt \geqslant \int_0^{t_к} E_{г.в} dt + Ор \frac{C_0}{C_д}. \qquad (90)$$

Для условий поливных и межполивных периодов баланс грунтовых вод определяет выражение (44), в котором все величины заданы, за исключением оптимальных значений $q_д$ и соответствующего ему $h_к$. Они могут быть определены из соотношения (89) и (90).

Иной подход состоит в отыскании экономико-математического оптимума, допуская в процессе вегетации соленакопление, которое удаляется во вневегетационный период промывками. В этом случае по выражениям (45) и (89) строят кривые дренажного стока и испарения из грунтовых вод в зависимости от интенсивности дрениро-

вания, по которому определяется минимальное солена-копление. Из семейства кривых $(h_{t_к} - h_{t_{к+1}}) = f(t)$ выбирают такую, которая дает минимум стоимости капиталовложений:

$$C_д + МК_в = f(h_{t_к} - h^0_{t_{к+1}}) = \min, \qquad (91)$$

где $C_д$ — стоимость дренирования в зависимости от интенсивности дренажа; $К_в$ — стоимость капиталовложений на 1 м³ воды в бассейне.

При этом подходе следует сначала увеличивать глубину дренажа до максимально возможной по техническим параметрам (исходя из отметок водоприемника и методов строительства), а затем учащать дренаж, увеличивая тем самым величину $(h_{t_к} - h^0_{t_{к+1}})$, а отсюда и скорость сработки уровня грунтовых вод.

Правильный выбор типа мелиоративного режима имеет существенное значение: снижает загрязнение возвратных вод, позволяет не только максимально снизить расходы воды на мелиоративные цели, но и улучшить качества речных вод. Действительно, применяя на мелиоративно-неблагополучных землях полугидроморфный режим за счет усиленного испарения, ежегодно вовлекали в солеоборот огромное количество солей, которые вымывали при последующих промывках. Вред здесь получается двойной. С одной стороны, расходуется излишнее количество воды, с другой — загрязняются речные воды, куда сбрасываются дренажные стоки.

Расчеты для Голодной степи показали, что при поддержании дренажем среднего уровня грунтовых вод в течение года на глубине 2,8—3 м вынос солей будет составлять 3—4 т/га, а при уровне грунтовых вод 1,5—2 м — 10—15 т/га. Эти расчеты хорошо согласуются с наблюдениями авторов по новой зоне Голодной степи с 1967 по 1973 г., где вынос солей составлял ежегодно в среднем от 1,2 до 10 т/га с дренированной площади в период освоения и промывок. Только в 1969 г., когда уровень грунтовых вод на дренированных землях превысил вследствие многоводности 1,8 м, вынос солей (с учетом промывок) возрос до 29,6 т/га.

ГЛАВА 3

РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Способы расчета дренажа на орошаемых землях

Рассмотрим предложения различных авторов по расчету горизонтального дренажа, используемого на орошаемых землях в целях предупреждения развития процессов засоления. Из способов, применявшихся достаточно давно, упомянем только наиболее значимые.

Принципиальное значение до сих пор сохраняют предложения А. Н. Костякова, сделанные им еще в начале 30-х годов (Костяков, 1960). Обоснованно отметив, что устройство дренажа отнюдь не исключает необходимости в одновременном проведении агротехнических и эксплуатационных мероприятий, он в качестве основного выдвинул принцип определения расстояний, исходя из нужных темпов понижения грунтовых вод между дренами (сообразно характеру сельскохозяйственного использования осушаемой территории). Принятая А. Н. Костяковым расчетная схема понижения (подъема) грунтовых вод под влиянием работы дренажа и водообмена между грунтовыми водами и зоной аэрации послужила основой для составления следующего балансового уравнения:

$$-\varphi\mu B dh = [Q - B(\alpha_1 Oc - \alpha_2 M_1)]dt, \qquad (92)$$

где φ — коэффициент, учитывающий форму свободной поверхности ($\varphi \simeq 1$); μ — коэффициент водоотдачи (недостаток насыщения); B — расстояние между горизонтальными дренами; Q — двусторонний приток на 1 м дрены, зависящий от действующего напора; $\alpha_1 Oc$ — количество осадков, идущее на питание грунтовых вод; $\alpha_2 M_1$ — доля водообмена между грунтовыми водами и зоной аэрации в суммарном испарении.

Далее А. Н. Костяковым были получены расчетные формулы для различных фильтрационных схем, позволяющие находить расстояние между дренами по заданному отрезку времени и известной глубине сработки грунтовых вод. Считалось возможным определять междренные расстояния по результатам расчетов снижения

грунтовых вод после проведения профилактических промывных поливов с последующей проверкой режима грунтовых вод в течение вегетационного периода.

Главным достижением А. Н. Костякова следует признать его предложение использовать уравнение (92) для прогнозирования режима грунтовых вод. Как показала практика инженерных расчетов, применение уравнений такого типа оказалось исключительно плодотворным в расчетах дренажа при составлении прогнозов режима уровней грунтовых вод и составляющих водного баланса. Следует подчеркнуть, что результаты расчетов по формулам, основанным на уравнении (92), и формулам, полученным из линеаризованного уравнения нестационарной фильтрации Буссинеска, для некоторых случаев практически совпали (Насиковский, 1969).

Особенно детальному сравнению подвергалось решение, полученное на основе использования уравнения вида (92) с известным решением С. Ф. Аверьянова (1959), описывающим неустановившуюся фильтрацию к дренам, расположенным над водоупором. По результатам исследований, В. П. Насиковский для определения междренного расстояния B в условиях неустановившегося режима рекомендовал следующую формулу:

$$B = 4\left(\sqrt{\Phi_д^2 + \frac{\tau T}{4\mu}} - \Phi_д\right), \qquad (93)$$

где T — суммарная проводимость водоносной толщи; $\Phi_д$ — фильтрационное сопротивление на гидродинамическое несовершенство дренажа; τ — время стабилизации, равное $\tau = \mu L^2/T\alpha$; α — коэффициент висячести (по С. Ф. Аверьянову); $L = B/2$.

Нужно заметить, что в свое время в среднеазиатских проектных организациях довольно широкое распространение получил разработанный А. П. Вавиловым способ расчета дренажа. Для построения графика внутригодового колебания уровня грунтовых вод использовалось уравнение общего водного баланса, записанное А. П. Вавиловым в следующем виде:

$$W_н + Ос + В + П = И + Д + W_к, \qquad (94)$$

где $W_н$ и $W_к$ — соответственно начальные и конечные запасы влаги в расчетном слое; В — разность между притоком и оттоком поверхностных вод (в том числе и по оросительной сети); остальные обозначения известны.

Для расчетов по уравнению (94) необходимо иметь экспериментальные данные о влагозапасах в расчетном слое почвы в зависимости от уровня грунтовых вод.

А. П. Вавилов предложил линейную зависимость между дренажным стоком и действующим напором:

$$Д = A_0 (h_{др} - y_{ср}), \qquad (95)$$

где A_0 — коэффициент дренированности (по А. П. Вавилову); $h_{др}$ — расстояние от поверхности земли до уровня воды в дрене; $y_{ср}$ — средняя для рассматриваемого периода глубина залегания грунтовых вод.

Задавшись коэффициентом A_0 и внутригодовым распределением остальных членов уравнения (94), можно по отдельным интервалам времени, например для очередного месяца, строить проектный график колебания грунтовых вод, если известна начальная отметка положения грунтовых вод y_1.

Расчет считался законченным, если уровень грунтовых вод в течение вегетации не поднимался до глубины менее критической. Выполнение этого условия приравнивалось к обеспечению благоприятного мелиоративного состояния земель. В противном случае приходилось менять коэффициент дренированности, значение $h_{др}$, оросительную норму и др.

По найденному графику грунтовых вод и принятым исходным данным не составляло особого труда найти значения отдельных составляющих водного баланса за каждый месяц и в целом за год.

Для вычисления удельной протяженности дренажа $l_{др}$, а тем самым и междренных расстояний, А. П. Вавилов предлагал пользоваться формулой А. Н. Костякова, которая в данном случае записывалась в виде

$$A_0 = \frac{30 \pi K l_{др}}{\ln \frac{10\,000}{l_{др} d} - 1}, \qquad (95а)$$

где d — расчетный диаметр дрены.

Рассмотрение этой формулы, в частности, показывает, что величина A_0 является не чем иным, как удельным, то есть приведенным к 1 м напора, дренажным модулем, выраженным в данном случае в м²/месяц с 1 га.

В последующем А. П. Вавилов (1971) упростил свой способ расчета, сделав его менее громоздким.

К несомненным достоинствам описанного способа расчета дренажа следует отнести наглядность получаемых результатов. Кроме этого, значительную ценность представляли фактические данные о суммарном испарении и влагозапасах, собранные и обработанные А. П. Вавиловым по материалам исследований в Голодной степи.

А. И. Голованов (1967) установил связь между коэффициентом A_0, входящим в зависимость (95), и известными формулами, используемыми в расчетах дренажа. Так, при относительно небольшой мощности водоносного пласта T в соответствии с формулой Кене и с учетом поправки на висячесть дрен, по С. Ф. Аверьянову, была выведена зависимость:

$$A_0 = \frac{8\alpha KT}{B^2}, \tag{96}$$

а при глубоком расположении водоупора в соответствии с формулой А. Н. Костякова было получено следующее выражение:

$$A_0 = \frac{\pi K}{B\left(\ln\frac{B}{d} - 1\right)}. \tag{96а}$$

Следуя тем же путем, на основе формулы Хоугхаудта получаем зависимость:

$$A_0 = \frac{\pi K}{B\left\{\left(\ln\frac{B}{d} - 0{,}454\right) + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\ln\frac{\left[(2n-1)^2\frac{B^2}{4} + 4t^2\right]^2}{(n^2B^2 + 4t^2)\left[(n-1)^2B^2 + 4t^2\right]}\right\}}. \tag{97}$$

Коэффициент A_0 в приведенных формулах (96) — (97) равен 1/сут. Если расчет вести на площадь 1 га, то числитель упомянутых формул следует умножить на 10 000, тогда размерность коэффициента будет м²/сут.

Принципиально новый подход к расчету дренажа на орошаемых землях был предложен С. Ф. Аверьяновым (1965). До этого прогноз солевого режима вообще не привлекался для целей обоснования параметров дренажа. Мелиоративное благополучие орошаемого массива считалось обеспеченным в том случае, если проектный уровень грунтовых вод удовлетворял понятиям критический режим грунтовых вод или критическая глубина их залегания.

Подвергнув справедливой критике эти понятия, С. Ф. Аверьянов предложил параметры дренажа, найденные по данным о среднегодовой нагрузке на него для условий эксплуатационного периода, проверять по результатам прогноза солевого режима почвогрунтов зоны аэрации орошаемого массива. Составление прогноза основывалось на решении основного уравнения конвективной диффузии для случая установившегося режима и гидродинамичности нейтральной пористой среды (обмен между твердой и жидкой фазами отсутствует). С. Ф. Аверьянов также рекомендовал вести водобалансовые расчеты по следующим уравнениям:

$$\left.\begin{array}{l}\text{для поверхностных и почвенных вод (на полях)}\\ \Delta W_{\text{пов}}+\Delta W_{\text{почв}}=\text{Ор}+\text{А}-M_1+(1-\alpha)\Phi_{\text{к}}-\overline{\text{С}}\pm g;\\ \text{для грунтовых вод}\\ \Delta W_{\text{гр}}=\pm g+\text{П}-\text{О}+\alpha\Phi_{\text{к}}-\text{Д}\pm p;\\ \text{общий баланс}\\ \Delta W=\text{Ор}+\Phi_{\text{к}}+\text{А}-M_1+(\text{П}-\text{О})-\overline{\text{С}}-\text{Д}\pm p.\end{array}\right\}\quad(98)$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

ΔW — изменение общих запасов влаги за расчетный период времени; $\Delta W_{\text{пов}}$, $\Delta W_{\text{почв}}$, $\Delta W_{\text{гр}}$ — изменение запасов поверхностных, почвенных и грунтовых вод за тот же промежуток времени ($\Delta W=\Delta W_{\text{пов}}+\Delta W_{\text{почв}}+\Delta W_{\text{гр}}$); Ор — водоподача нетто с учетом промывного режима; А — атмосферные осадки за вычетом поверхностного стока; M_1 — суммарное испарение с поверхности орошаемых полей; П — подземный приток грунтовых вод; О — подземный отток грунтовых вод; $\overline{\text{С}}$ — поверхностные сбросы непосредственно с полей; Д — дренажный сток за пределы орошаемой территории; p — вертикальный водообмен грунтовых вод с более глубоко залегающими подземными водами; $\Phi_{\text{к}}$ — потери на фильтрацию из оросительной сети; α — доля фильтрационных потерь, идущая на питание грунтовых вод (при близком залегании грунтовых вод $\alpha=1$); g — водообмен между почвенными и грунтовыми водами.

С помощью уравнения общего водного баланса (98) можно определить нагрузку на дренаж Д, если задаться значениями остальных членов уравнения. Нагрузка на дренаж, как отмечал С. Ф. Аверьянов (1965), даже при самых благоприятных условиях не может быть меньше суммы $\alpha\Phi_{\text{к}}+g$. Действительно, если баланс составлять для года в целом и принять вследствие этого изменение запасов влаги равным нулю, то из уравнения баланса грунтовых вод следует:

$$\text{Д}=g+\alpha\Phi_{\text{к}}+\text{П}-\underline{\text{О}}\pm p. \quad (99)$$

Водообмен между почвенными и грунтовыми водами g включен в это уравнение со знаком плюс, так как считается, что имеет место промывной режим орошения. По сути дела, член g в данном случае представляет собой инфильтрационное питание грунтовых вод.

Среднегодовую интенсивность поступления воды в почву V_2 находим по выражению:

$$V_2 = \frac{g}{Wt},$$

где W — средняя влажность почвогрунтов зоны аэрации, доли единицы; t — продолжительность расчетного периода, в данном случае $t=365$ суток; g — количество воды, поступившее из питание грунтовых вод через зону аэрации, м.

Выдвинутые С. Ф. Аверьяновым положения в дальнейшем были развиты в работах И. П. Айдарова, А. И. Голованова, Л. М. Рекса, Д. Ф. Шульгина, В. Х. Хачатурьяна и др.

И. П. Айдаров (1971) на примере одного из участков Канибадамского миссива в Таджикской ССР показал удовлетворительную сходимость расчетных и фактических данных по динамике содержания солей в почве. Это позволило ему для обоснования промывного режима орошения, параметров дренажа, сроков и норм капитальных промывок рекомендовать методы расчета, основанные на представлениях физико-химической гидродинамики пористых сред. В своих работах И. П. Айдаров проиллюстрировал предложения по расчету рядом содержательных примеров и обратил внимание на необходимость выбора оптимального мелиоративного режима на основе инженерных технико-экономических расчетов.

Прогноз водного режима с большой степенью приближения к естественным условиям можно получить путем решения уравнения влагопереноса, что, в свою очередь, повысит и достоверность прогнозов солевого режима.

Наиболее разработана для обоснования мелиоративных мероприятий на засоленных землях методика А. И. Голованова, созданная под руководством и при участии С. Ф. Аверьянова (Аверьянов, Голованов, Никольский, 1974; Голованов, Новиков, 1974).

Для реализации расчетов по этой методике А. И. Голованов разработал серию алгоритмов и программ для ЭВМ нескольких марок, позволяющую рассчитывать

и проверять заданный режим орошения, определять нормы промывных поливов при известных сроках их проведения. Данная модель влагопереноса учитывает слоистость почвогрунтов, различающихся своими водно-физическими характеристиками.

Для обоснования проектных решений в результате обобщения опыта применения горизонтального дренажа в новой зоне орошения Голодной степи Ф. В. Серебренников (институт «Средазгипроводхлопок») предложил способ расчета параметров мелиоративного дренажа на основе прогнозирования водного и солевого режимов.

При составлении прогноза режима уровня грунтовых вод и составляющих водного баланса в качестве исходного было принято уравнение С. Ф. Аверьянова (98), которое служит для определения нагрузки на дренаж. Для прогнозных расчетов это уравнение было записано следующим образом:

$$[Д(y) + M_1(y;\ t) - Ф_к - A \pm p(y) - Ор]\,dt = 10000\ \mu(y)dy, \quad (100)$$

где y — расстояние от поверхности земли до уровня грунтовых вод, м; $\mu(y)$ — коэффициент текущей водоотдачи (недостаток насыщения), доли единицы. Размерность остальных членов уравнения — м³/сут, причем все составляющие водного баланса отнесены к площади, равной 1 га.

Текущая водоотдача при колебании уровня грунтовых вод в диапазоне глубин, не превышающих ординату H_W, принимается в соответствии с рекомендациями С. Ф. Аверьянова (1956)

$$\mu(y) = W_1\left\{1 - \sqrt{1 - \frac{y}{H_к}\left[1 - \left(\frac{W_0}{W_1}\right)^2\right]}\right\}, \quad (101)$$

где W_1 — полная влагоемкость за вычетом защемленного воздуха; W_0 — максимальная молекулярная влагоемкость.

При достижении грунтовыми водами глубин, превосходящих H_W, коэффициент водоотдачи принимается постоянным и равным

$$\mu = W_1 - W, \quad (102)$$

где W — средняя для данного периода влажность в активном слое почвы.

В программах для ЭВМ при прогнозировании уровня грунтовых вод и составляющих водного баланса

межполивные периоды и проведение поливов учитываются отдельно. Для межполивных и невегетационного периодов расчет ведется по уравнению (100), в котором Ор=0.

При определении подъема уровня грунтовых вод ввиду краткосрочности проведения поливов условно принимается, что вся поливная норма идет на пополнение запасов влаги в зоне аэрации и на подъем грунтовых вод, не расходуясь на суммарное испарение и сток в дренаж. Если перед поливом $y_1 < H_W$, то положение УГВ после полива находим с помощью формулы С. Ф. Аверьянова (1956):

$$S_y - m = W_1 y_2 - \frac{2}{3}\frac{W_1 H_к}{\beta}\left[1 - \left(1 - \beta\frac{y}{H_к}\right)^{\frac{3}{2}}\right], \qquad (103)$$

где S_y — свободная емкость зоны аэрации при глубине грунтовых вод y_1; m — поливная норма; $\beta = 1 - (W_0/W_1)^2$.

При $y_1 \geqslant H_W$ подъем уровня грунтовых вод рассчитывается при постоянном коэффициенте водоотдачи, принимаемом по формуле (102).

Чтобы активный слой почвы в вегетационный период не переувлажнялся или не иссушался ниже допустимого предела, уровень грунтовых вод должен залегать в некотором диапазоне глубин от $h_в$ до $h_н$. Верхняя граница указанного диапазона определяется исходя из условий, что УГВ после полива не приближается к поверхности земли, например, на расстояние менее 1 м. Значение $h_в$ в зависимости от поливной нормы m и водно-физических свойств грунта находится из уравнения

$$S_1 + m = W_1 h_в - \frac{2}{3}\frac{W_1 H_к}{\beta}\left[1 - \left(1 - \beta\frac{h_в}{H_к}\right)^{\frac{3}{2}}\right], \qquad (104)$$

где S_1 — свободная емкость зоны аэрации при глубине грунтовых вод 1 м.

Выражение (104), как и аналогичное ему выражение (103), приводится к уравнению третьей степени относительно искомого параметра $h_в$ или y_2, в связи с чем при отыскании его корней не возникает сколько-нибудь существенных затруднений.

Значение $h_н$, отвечающее нижней границе допустимого диапазона залегания УГВ, находится исходя из требований поддержания влажности в активном слое

почвы на уровне не ниже 0,7 ППВ по зависимостям Л. М. Рекса (1975) или по аналогичным.

Дренаж на ЭВМ рассчитывают следующим образом. На основании уравнения (100) и ряда других зависимостей ведется прогноз режима грунтовых вод в разрезе года отдельно для основных культур севооборота (хлопчатник, люцерна) на отдельные периоды с учетом срока поливов. За такой период принимается месяц, в течение которого соответствующие ему суммарное испарение и осадки можно принимать постоянными (Голованов, 1967). В программах для ЭВМ учитывается, что месяц можно разделить на несколько неравных отрезков в зависимости от числа поливов, проводимых внутри месяца. Поскольку последовательность и режимообразующие факторы повторяются из года в год, проектный режим грунтовых вод в многолетнем разрезе имеет цикличный характер.

Цель прогнозирования водного режима — подбор такого значения интенсивности дренирования A_0, при котором в течение вегетации происходит предусмотренное число поливов в рамках заданной оросительной нормы и обеспечивается оптимальная влажность в активном слое почвы, то есть УГВ не выходит за пределы $h_в$—$h_н$. Начальное значение A_0 принимается в соответствии с результатом вычисления средневегетационной нагрузки по уравнению (98).

По итогам прогноза составляющих водного баланса для последующего прогноза солевого режима на характерные периоды вычисляются восходящие и нисходящие скорости в зоне аэрации. В пределах каждого периода скорости принимаются постоянными (Оросительные мелиорации, 1973).

Нисходящую скорость при поливе определяем по формуле

$$v = \frac{m}{10\,000\,W\Delta t}, \qquad (105)$$

где W — влажность почвогрунтов зоны аэрации в период проведения полива; Δt — продолжительность полива, сутки.

Величина и направление скорости движения влаги в остальное время вычисляются по формуле

$$v = -\frac{M_1 - A}{10\,000\,W\Delta t}, \qquad (106)$$

где M_1 и A — соответственно объемы воды, затраченные на суммарное испарение с 1 га или поступившие в виде осадков на ту же площадь за расчетный период времени Δt, м³; W — влажность почвогрунтов зоны аэрации в межполивной период.

При тех же предпосылках разработаны два варианта расчета, реализованные в виде отдельных программ для ЭВМ.

Первый позволяет подбирать режим орошения при заданной интенсивности дренирования A_0. Прочие факторы, такие как характеристика водно-физических свойств грунтов, метеорологические показатели, считаются известными. Этот вариант расчета может быть использован для корректировки проектного режима орошения, если последний оказался неприемлемым по результатам прогноза солевого режима.

Второй вариант служит для составления прогнозов водного режима на длительные промежутки времени — пять, десять и более лет. Причем для каждого года в отдельности или для произвольной группы лет могут быть приняты различные режимы орошения и метеорологические показатели. Это дает возможность, во-первых, составить прогноз водного режима для мелиоративного периода работы оросительной системы (в случае относительно близкого исходного залегания грунтовых вод). Во-вторых, проверить проектные параметры дренажа по фактическим данным о погодных условиях и режиме орошения, взятым по объекту-аналогу за предыдущие годы (так называемый ретроспектный анализ, по А. И. Голованову).

Прогноз солевого режима проводится только для вариантов, в которых обеспечивается заданное число поливов и залегание УГВ в диапазоне $h_в$—$h_н$ в течение вегетационного периода, то есть в тех случаях, когда выдерживается проектный режим орошения и соответствующая влажность в активном слое почвы.

Исходными для составления прогноза служат данные о значениях нисходящих и восходящих скоростей в зоне аэрации для характерных периодов внутри года. Таким образом осуществляется связь между водным и солевым режимами.

Прогноз солевого режима почвогрунтов зоны аэрации выполняется в многолетнем разрезе на период, равный одной ротации. Так, при девятипольном севообороте сначала составляется прогноз на шестилетний срок с

привязкой к условиям возделывания хлопчатника, причем должен быть известен начальный профиль содержания солей. Для каждого последующего года исходным служит конечный солевой профиль предыдущего года. Затем в расчет вводится режим орошения люцерны, за исходный принимается профиль засоления, полученный по истечении шестилетнего срока возделывания хлопчатника.

После завершения расчетов проводится анализ полученных результатов. Выше отмечалось, что прогноз солевого режима почвогрунтов зоны аэрации служит критерием приемлемости рассматриваемого варианта режима орошения и расчетной интенсивности дренирования. Для дальнейших расчетов принимаются такие варианты, в которых в слое 0—1 м содержание солей не превышает уровня, начиная с которого происходит снижение урожайности сельскохозяйственных культур.

Программы для ЭВМ М-222 предусматривают возможность получать прогноз солевого режима в целом на ротацию или только для одной культуры, на несколько лет вперед или на один год с распечаткой солевых профилей внутри года или только на конец расчетного года. Таким образом, по результатам прогноза водного и солевого режима выбирается расчетное значение интенсивности дренирования A_0.

Далее определяются междренные расстояния, удельная и общая протяженность дренажа. Междренные расстояния при известном фильтрационном строении дренируемой толщи и параметре A_0, принятом по результатам прогноза водно-солевого режима, вычисляются с помощью ЭВМ. Программы для ЭВМ составлены в соответствии с методикой, изложенной в работе А. Я. Олейника и В. П. Насиковского (1970).

При использовании в прогнозных расчетах уравнения общего водного баланса, с одной стороны, допускается определенное осреднение водного режима в зоне аэрации, что может сказаться на точности прогнозов солевого режима. С другой стороны, расчеты по уравнению влагопереноса связаны с трудностями получения ряда исходных данных по материалам изысканий. Поэтому Ф. В. Серебренников предложил способ расчета, основанный на совместном численном решении системы уравнений водного баланса почвенных и грунтовых вод:

$$\Delta W_1 = [(1-\gamma)A + (1-\alpha)\Phi_к \pm g + (1-\delta)Ор - M_1]\,\Delta t, \quad (107)$$

$$\Delta W_2 = [Д(y) \pm g - \gamma A - \delta Op - \alpha \Phi_к \pm p]\,\Delta t, \quad (108)$$

где ΔW_1 и ΔW_2 — изменение запасов почвенных и грунтовых вод в границах рассматриваемой территории; γ — доля осадков, идущая на пополнение грунтовых вод (зависит от положения УГВ); α — доля фильтрационных потерь, идущая на питание грунтовых вод; δ — доля оросительной воды, идущая на питание грунтовых вод. Размерность членов уравнения (107) и (108), за исключением α, γ, δ и y м³/сут с 1 га.

Принципиальный интерес представляет интерпретация членов ΔW_1 и ΔW_2. При этом использовалась зависимость С. Ф. Аверьянова (1956), описывающая распределение влаги над уровнем грунтовых вод:

$$W_y = W_1 \sqrt{1 - \frac{y}{H_к}\beta}\,. \quad (109)$$

Было принято, что в активном слое почвы в вегетационный период влажность меняется в пределах от W_{min} до $W_{ппв}$, в остальное время от W_0 до $W_{ппв}$. Влажностям $W_{min} = 0{,}7\,W_{ппв}$ и $W_{ппв}$ на рисунке 19 отвечают ординаты h_1 и h_2, которые получаем по формуле

$$h_i = y_i - H_к \frac{\left(1 - \frac{W_i}{W_1}\right)^2}{\beta}, \quad (110)$$

где W_i — текущая влажность в активном слое почвы.

В соответствии со сказанным были предложены следующие зависимости:

$$\Delta W_i = 10\,000\left\{h_{i+1}W_{i+1} - h_iW_i - \frac{2}{3}\frac{W_1H_к}{\beta}\left[\left(\frac{W_{i+1}}{W}\right)^3 - \left(\frac{W_i}{W}\right)^3\right]\right\}, \quad (111)$$

$$\Delta W_2 = 10\,000\,(W_1 - W_{i+1})\,(y_i - y_{i+1}). \quad (112)$$

Предложенные Ф. В. Серебренниковым выражения позволяют в период проведения полива одновременно учитывать накопление влаги в активном слое почвы в диапазоне влажности W_{min} — $W_{ппв}$ и изменение уровня грунтовых вод при переменном коэффициенте недостатка насыщения. В межполивной период соответственно учитывается расходование влаги из активного слоя с одновременным перемещением уровня грунтовых вод при переменном коэффициенте водоотдачи.

Следует добавить, что во время проведения полива, после того, как влажность в активном слое почвы до-

стигнет предельной полевой влагоемкости, дальнейший подъем (или спад) грунтовых вод будет происходить при постоянном коэффициенте недостатка насыщения, равном $\mu = W_1 - W_{ппв}$.

Более того, в результате капиллярного сброса произойдет непосредственное питание грунтовых вод за счет поступающей в почву влаги. Благодаря этому для расчета изменения уровня грунтовых вод в отличие от предыдущего случая можно ограничиться только одним выражением:

$$\left[A_0(h_{др} - \frac{y_i + y_{i+1}}{2} - Ор - \alpha \Phi_к \pm p\right] \Delta t = \\ = 10000(W_1 - W_{ппв})(y_i - y_{i+1}). \qquad (113)$$

Если полив продолжается, то в диапазоне глубин

$$0 \leqslant y \leqslant H_к \frac{1 - \left(\frac{W_{ппв}}{W_1}\right)^2}{\beta} \qquad (114)$$

подъем грунтовых вод определяется формулой (113), в которую вводится переменный коэффициент недостатка насыщения.

Процесс спада грунтовых вод происходит несколько иначе. В диапазоне глубин, определяемом условием (114), расчет проводится аналогично описанному. Дальнейший спад уровня грунтовых вод вычисляется на основе системы уравнений (110) и (111) с учетом водообмена между почвенными и грунтовыми водами и сокращения запасов влаги в активном слое почвы по сравнению с предельной полевой влагоемкостью.

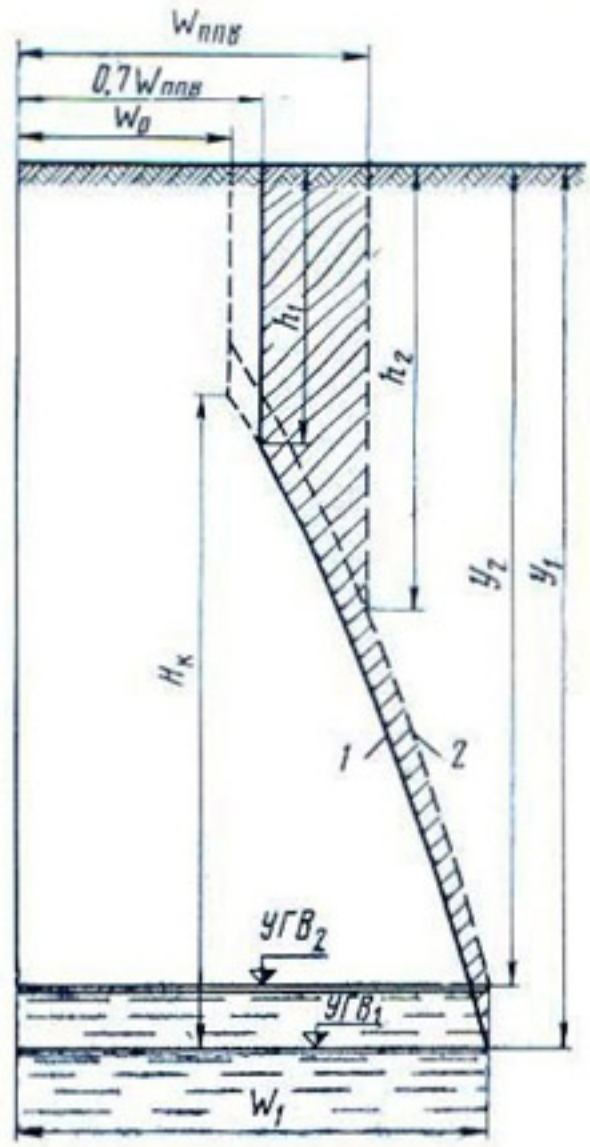


Рис. 19. Расчетные эпюры влажности на начало (*1*) и конец (*2*) увлажнения активного слоя почвы при поливе (заштрихована зона изменения влажности).

Результаты прогноза водного режима, как и ранее, служат для последующих расчетов изменения содержания солей.

К балансовым можно отнести и расчет горизонтального дренажа, описанный в работе Ф. Б. Абуталиева, М. Б. Баклушина, Я. С. Ербекова и др. (1975).

Ряд интересных предложений по расчету проектного графика грунтовых вод в увязке с дренажем можно найти в работах Н. М. Решеткиной и А. М. Сойфера (1975).

Завершая обзор, необходимо подчеркнуть, что расчеты дренажа в настоящее время, несмотря на использование ЭВМ, отличаются большой трудоемкостью и носят многовариантный характер. Большое значение приобрело надлежащее обоснование исходных данных, так как в прямой зависимости от их достоверности находятся расчетные значения параметров дренажа.

Рассмотренные способы расчета дают однозначный ответ в отношении параметров дренажа, если оросительная норма по каким-либо причинам не подлежит изменению. В противном случае можно подобрать ряд сочетаний режима орошения и параметров дренажа, при которых обеспечиваются благоприятные водный и солевой режимы в активном слое почвы. Можно еще более расширить и усложнить задачу, если рассматривать оросительную сеть с разным к.п.д., закрытый дренаж различной конструкции и др. Тем самым задача сводится к выбору оптимального варианта на основе технико-экономических расчетов. В более широком плане можно говорить о задаче оптимизации параметров гидромелиоративной системы и размеров оросительных норм, связав ее с решением такого сложного вопроса, как целесообразность создания того или иного типа мелиоративного режима на территории орошаемого массива.

Исследования в этом направлении только начаты. О сложности проблемы оптимизации параметров оросительной системы дают представление работы Л. М. Рекса (1974) и И. П. Айдарова и Э. К. Каримова (1974), положившие начало количественным методам в этой области.

В свете сказанного описанные выше способы расчета дренажа следует рассматривать как составную часть технико-экономического обоснования оптимального варианта мелиоративного режима и параметров оросительной системы.

Пример расчета дренажа

Расчет дренажа — составная часть технического проекта орошения и освоения земель конкретного объекта. Поэтому расчет опирается на данные почвенно-мелиоративных и инженерно-геологических исследований и исходит из принятой в проекте технической схемы оросительной системы.

Ниже приводится пример расчета для определения протяженности дренажной сети на территории совхоза № 11 первой очереди орошения и освоения земель Каршинской степи.

Один из самых сложных вопросов расчета дренажа — обоснованный выбор исходных данных, в достаточной степени отражающих природно-хозяйственные условия проектируемого массива. При этом следует учитывать, что если в отношении назначения состава севооборота, продолжительности ротации, к.п.д. оросительной сети обычно не возникает серьезных затруднений (они принимаются по проектным проработкам), то обоснование расчетных значений, например водно-физических характеристик почвогрунтов, исходного солевого профиля, осадков, испарения, тесно связано со статистическими методами обработки и анализа данных изысканий. Большие исследования по затронутой проблеме выполнены кафедрой сельскохозяйственных мелиораций МГМИ, они нашли отражение в работах И. П. Айдарова, Л. Ф. Пестова (1973) и др. Их рекомендации широко использованы в последующем изложении.

Гидрогеологические условия территории совхоза характеризуются слабой естественной дренированностью, в связи с чем при орошении неизбежно произойдет подъем минерализованных грунтовых вод. Для предотвращения процессов вторичного засоления на территории совхоза необходимо предусмотреть строительство горизонтального дренажа, в том числе на части территории — комбинированного (по условиям литологического строения водоносного комплекса).

Основное направление хозяйства — хлопководческое. Принят девятипольный хлопково-люцерновый севооборот: продолжительность возделывания хлопчатника на одном поле 6 лет, люцерны — 3 года. Общая продолжительность ротации — 9 лет. Основные исходные данные по режиму орошения приняты следующие:

Хлопчатник

Вегетационные поливы

Оросительная норма, м³/га	6400
Сроки	16/V—15/IX
Число вегетационных поливов	4
Нормы вегетационных поливов, м³/га	1600, 1600, 1600, 1600
Дата проведения первого полива	16/V
Сроки учета фильтрации из оросительной сети	16/V—30/IX

Предпахотные поливы

Норма предпахотного полива, м³/га	700
Сроки	21/X—20/XI
Дата проведения полива	1/XI
Сроки учета фильтрации из оросительной сети	1/XI—30/XI

Влагозарядковые поливы

Норма влагозарядкового полива, м³/га	2000
Сроки	1/II—15/III
Дата проведения полива	16/II
Сроки учета фильтрации из оросительной сети	16/II—31/III

Люцерна

Вегетационные поливы

Оросительная норма, м³/га	8600
Сроки	11/IV—25/IX
Число вегетационных поливов	6
Нормы вегетационных поливов, м³/га	1450, 1450, 1450, 1450, 1450, 1350
Дата проведения первого полива	11/IV
Сроки учета фильтрации из оросительной сети	11/IV—30/IX

Влагозарядковые поливы

Норма влагозарядкового полива, м³/га	1900
Сроки	1/XI—25/XII
Дата проведения полива	21/XI
Сроки учета фильтрации из оросительной сети	21/IX—31/I

Продолжительность полива принимается по экспериментальным данным или по результатам расчета элементов техники полива (Лактаев, 1975).

Согласно проектным решениям Средазгипроводхлопка, к.п.д. внутрихозяйственной оросительной сети составляет 0,85 (каналы в бетонной облицовке и железобетонные лотки).

Находится начальная расчетная интенсивность дренирования A_0, для этого определяется средневегетационная нагрузка на дренаж при $\Delta W = 0$. Кроме этого, соглас-

но инженерно-геологическим изысканиям $p = \underline{\Pi} = \underline{О} = \overline{С} = 0$.

Остальные элементы водного баланса известны из предыдущего изложения и помещены в таблице 6, где одновременно приводятся и результаты вычислений.

Таблица 6. **Элементы расчетного водного баланса, м³/сут на 1 га**

Культура	$Ф_к$	А	$О_р$	$М_1$	Д
Хлопчатник	1130	550	6400	7300	780
Люцерна	1520	550	8600	7900	2770

Далее может быть найдена нагрузка на дренаж для комплексного гектара

$$Д_к = 780 \cdot 0{,}67 + 2770 \cdot 0{,}33 = 1437 \text{ м}^3.$$

Продолжительность вегетационного периода $T = 183$ сут. Ориентировочно принимается $H = 1$ м и определяется расчетное значение интенсивности дренирования, которое и используется в последующих расчетах:

$$A_0 = \frac{Д_к}{T_H} = \frac{1437}{183 \cdot 1} = 7{,}8 \approx 8 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Проектная глубина заложения дренажа составляет 3,35 м. Расчетные значения водно-физических характеристик получают путем статистической обработки материалов почвенно-мелиоративных исследований.

По рекомендациям А. И. Голованова для водно-физических характеристик в качестве расчетных принимаются значения, отвечающие 75%-ной обеспеченности на интегральной кривой распределения случайной величины.

По результатам статистической обработки были приняты следующие водно-физические характеристики: $H_к = 2{,}16$ м, $W_1 = 0{,}408$, $W_0 = 0{,}164$, $W_{ППВ} = 0{,}3$.

Минерализация оросительной воды и осадков принимается по данным гидрологических наблюдений Управления гидрометеослужбы (УГМС) и служб эксплуатации оросительных систем или по объектам-аналогам.

Пересчет на процентное содержание солей к сухой массе почвы производится по формуле

$$C_п = \frac{C_в W_{ср}}{10\gamma},$$

где $C_в$ — минерализация поливной воды, г/л; γ — средняя плотность почвы, г/см³; $W_{ср}$ — средняя влажность почвы, доли единицы.

Пересчет с процентов на миллиграмм-эквиваленты, в свою очередь, делается по формуле

$$C_{\text{мг-экв}} = \frac{C_{\text{п}} \cdot 1000}{\text{ЭВ}},$$

где ЭВ — эквивалентная масса.

По данным гидрологических наблюдений, минерализация оросительной воды по катиону натрия в вегетационный период составляет 0,113 мг-экв.

Начальный солевой профиль задается при составлении прогноза солевого режима. Рекомендуется принимать солевые профили с содержанием солей в активном слое ниже порога токсичности, что обеспечивается капитальными промывками и сопутствующими мероприятиями на стадии мелиоративного периода.

Расчетный солевой профиль получают путем статистической обработки материалов почвенно-мелиоративных исследований. В соответствии с рекомендациями Московского гидромелиоративного института (МГМИ) в качестве расчетных значений принимается такое содержание солей (по плотному остатку, хлор-иону), которое отвечает 90%-ной обеспеченности на интегральной кривой распределения случайной величины (Айдаров, Пестов, 1973).

Статистическая обработка ведется отдельно для каждого интервала глубин. Прогноз солевого режима целесообразно проводить при хлоридном и сульфатно-хлоридном типах засоления по содержанию натрия (хлора), а при хлоридно-сульфатном и сульфатном — по плотному остатку.

Согласно почвенно-мелиоративным изысканиям, имеет место сульфатно-хлоридный тип засоления. По результатам статистической обработки в качестве начального принят следующий солевой профиль.

Горизонт, м	0	0,2	0,5	0,6	0,8	1,0
Содержание катиона натрия, мг-экв	0,870	0,978	0,665	0,696	1,087	2,000

Продолжение

Горизонт, м	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Содержание катиона натрия, м-экв	1,478	1,783	2,174	1,913	1,957

Коэффициент молекулярной диффузии рекомендуется принимать равным $Д_0 = 10^{-4}—10^{-5}$ м²/сут (Аверьянов, 1965). Коэффициент гидродисперсии λ получают на ЭВМ М-222 по программе «Определение параметров солепереноса по данным полевых и лабораторных экспериментов» путем обработки материалов опытных мелкоделяночных промывок. Причем все значения λ, полученные при максимальном отклонении между расчетными и фактическими значениями $\Delta S \geqslant 50\%$, бракуются. Остальные значения группируются в зависимости от механического состава почвогрунтов и подвергаются статистической обработке. В качестве расчетной рекомендуется принимать обеспеченность, равную математическому ожиданию. При отсутствии экспериментальных данных коэффициент λ можно принимать в соответствии с таблицей 7.

Таблица 7. **Рекомендуемые значения коэффициента гидродисперсии, м** (по данным Средазгипроводхлопка)

Почвы	Тип засоления	
	хлоридный, сульфатно-хлоридный	сульфатный и хлоридно-сульфатный
Легкие (супеси и легкий суглинок с повышенной водопроницаемостью)	0,7	0,9 (1,1)*
Легкосуглинистые	0,9	1,1 (1,3)*
Среднесуглинистые или аналогичные им по водопроницаемости	1,1	1,3 (1,5)*
Тяжелые суглинистые или аналогичные им по водопроницаемости	1,3	1,5 (1,7)*
Глинистые и другие с низкой водопроницаемостью	1,5	1,7 (1,9)*
Такырные глинистые с очень низкой водопроницаемостью	1,7	1,9 (2,1)*

* Для гипсированных почв.

Для дальнейших расчетов коэффициент гидродисперсии принимается равным $\lambda = 1$ м (по опытным данным), коэффициент молекулярной диффузии $Д_0 = 0{,}0001$ м²/сут.

Подземное питание грунтовых вод в соответствии с данными инженерно-геологических исследований принимается равным нулю.

Среднемноголетние месячные суммы осадков приняты по данным метеостанции г. Карши.

Расчетные значения суммарного испарения за холодное время года с октября по март приняты по экспериментальным данным института «Средазгипроводхлопок».

Для фильтрационного строения дренируемой толщи характерны схемы, представленные в таблице 8. Для этих фильтрационных схем в дальнейшем и производится расчет междренных расстояний.

Исходные данные для последующих расчетов на ЭВМ заносятся в специально составленные бланки, которые представляются заказчиком в вычислительный центр.

Таблица 8. **Характеристика типовых фильтрационных схем**

Типовая схема фильтрационного строения	m_1, м	K_1, м/сут	T_1, м²/сут	m_2, м	K_2, м/сут	T_2, м²/сут	m_3, м	K_3, м/сут
Горизонталь								
Однослойное строение								
	30	0,4	12	—	—	—	—	—
Двухслойное строение								
	20	0,4	8	10	1,5	15	—	—
Трехслойное строение								
	20	0,4	8	5	10	50	10	0,35
Комбинирован								
Двухслойное строение								
	12	0,4	4,8	8	5	40	—	—
	25	0,4	10	15	10	150	—	—

Как указывалось ранее, цель прогнозирования водного режима — подбор такого значения интенсивности дренирования A_0, при котором в течение вегетации реализуется заданное число поливов и обеспечивается оптимальная влажность в активном слое почвы. Искомое значение A_0 подбирается на ЭВМ (вначале нижний предел положения УГВ перед очередным поливом варьируется в интервале $h_в$—$h_н$).

$T_в$, м²/сут	Расчетные значения				Площадь, га	Общая протяженность, км
	W, м/сут	H, м	B, м	$l_{уд}$, м/га		
ный дренаж						
водоносного комплекса						
—	0,0006	1	270	37,04	900	33,33
водоносного комплекса						
—	0,0006	1	273	36,63	1350	49,45
водоносного комплекса						
3,5	0,0006	1	429	23,31	1000	23,31
ный дренаж						
водного комплекса						
—	0,0006	1	628	15,92	1250	19,9
—	0,0006	1	1212	8,25	1500	12,38

Месяц	I	II		III	IV	V	VI	VII	VIII		IX	X	XI	XII	Всего
Д, м³/га	128	56	138	302	260	101	300	278	274	160	224	140	155	142	2650
М, м³/га	360	230	200	460	810	474	1369	1549	1530	728	1125	720	390	300	10245
Фк, м³/га	—	8	83	199	64	—	243	221	221	111	221	111	82	41	1603
А, м³/га	340	182	158	500	380	82	—	—	—	—	—	60	200	290	2192
Р	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
t, сут.	31	15	13	31	30	15	33	30	30	15	30	31	30	31	365

а

Месяц	I	II	III	IV		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI		XII	Всего
Д, м³/га	277	222	221	65	294	242	202	237	277	334	163	79	97	295	3005
М, м³/га	360	430	460	770	1161	1404	1419	1412	1408	1471	720	260	390	300	11205
$Ф_к$, м³/га	—	—	—	–	238	189	160	190	223	286	231	—	82	254	1853
А, м³/га	340	340	500	927	—	—	—	—	—	—	60	133	67	290	1857
Р	—	—	—	–	—	—	—	—	—	—	—	—	–	—	—
t, сут.	31	28	31	10	32	25	22	24	30	38	31	20	10	31	365

б

Рис. 20. Расчетный режим грунтовых вод и составляющие водного баланса на эксплуатационный период:

а — для хлопчатника; *б* — для люцерны (A_0=6 м³/сут).

Машинный счет длится до тех пор, пока разница между начальной и конечной глубинами уровня грунтовых вод в их годовом цикле не станет менее 2 см. После этого ЭВМ рассчитывает составляющие водного баланса в среднем за год и на отдельные периоды внутри года, а также вычисляет скорости (восходящие и нисходящие) в зоне аэрации.

Вначале прогноз составляется для случая возделывания хлопчатника. Полученное по его результатам значение A_0 автоматически принимается при прогнозировании для случая возделывания люцерны. В данном примере подбор на ЭВМ дал расчетное значение $A_0=6$ м^2/сут.

Результаты расчета проектного режима грунтовых вод с данными о составляющих водного баланса представлены на рисунке 20.

Полученные данные о скоростях в зоне аэрации и числе отдельных периодов (сколько значений скоростей в данном варианте, столько же и расчетных периодов внутри года) используются для составления прогноза солевого режима почвогрунтов. Остальные данные, такие, как число культур в севообороте, число расчетных лет для данной культуры, минерализация оросительной воды, расчетный солевой профиль, приведены ранее.

Прогноз солевого режима выполняется на ротацию, причем прогноз содержания солей определится на конец очередного расчетного года, за исключением последнего года возделывания хлопчатника и люцерны, когда дается распечатка солевых профилей внутри года на соответствующие характерные периоды.

Начало расчетного года совпадает с датой первого характерного периода. В качестве первого расчетного периода рекомендуется принимать январь первого года возделывания хлопчатника.

На рисунке 21 дан график изменения содержания катиона натрия в слое 0—100 см на ротацию, составленный по результатам прогноза солевого режима. Для сравнения прогноз был выполнен по программам, учитывающим и не учитывающим наличие грунтовых вод. Согласно рисунку 21, как в том, так и в другом случае при $A_0=6$ м^2/сут в слое 0—100 см, содержание катиона натрия не превышает порога токсичности. Таким образом, в результате составления прогнозов водного и солевого режимов установлена расчетная интенсивность дренирования $A_0=6$ м^2/сут.

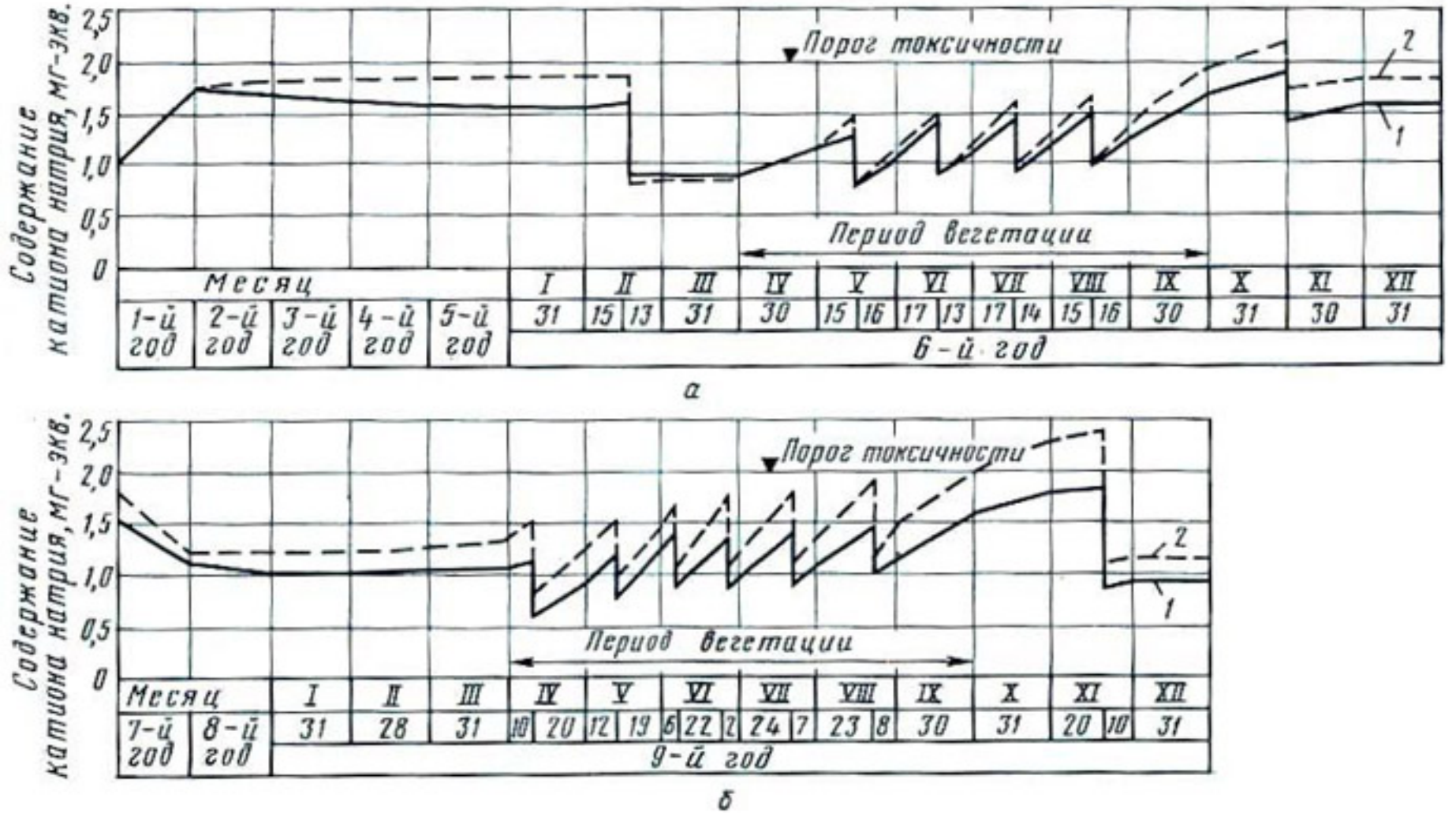


Рис. 21. Прогноз изменения содержания катиона натрия в слое 0—100 см:
а — для хлопчатника; *б* — для люцерны; *1* и *2* — с учетом и без учета грунтовых вод.

Отсутствие существенной разницы в результатах прогноза солевого режима для слоя почвы 0—100 см объясняется тем, что в качестве исходного был принят благоприятный солевой профиль. Следовательно, для условий эксплуатационного периода можно пользоваться любым из двух способов прогноза солевого режима. Однако при наличии значительных запасов солей в зоне аэрации, что обычно характерно для начальной стадии орошения, прогноз следует вести с учетом подвижной границы — уровня грунтовых вод. В противном случае можно получить необоснованно быстрое опреснение почвогрунтов зоны аэрации.

Далее определяется удельная протяженность дренажа для пяти схем фильтрационного строения при шаге между скважинами-усилителями $\delta = 60$ м. Вычисления междренных расстояний выполняются с помощью ЭВМ в соответствии с расчетными формулами.

Исходные данные для расчета междренного расстояния помещены в таблице 8, там же приведены результаты расчета — удельной и общей протяженности дренажа.

При вычислении междренных расстояний следует помнить, что связь между расчетной интенсивностью дренирования, нагрузкой на дренаж и средним за расчетный период действующим напором описывается линейной зависимостью. Средний за вегетацию действующий напор может быть вычислен по формуле (м)

$$H = \frac{Д}{TA_0},$$

где Д — дренажный сток за вегетацию 1 м^3, находится в результате прогноза водного режима; A_0 — расчетная интенсивность дренирования, м^2/сут; T — продолжительность вегетационного периода, сут.

Расчет завершается вычислением удельной и общей протяженности дренажа.

ГЛАВА 4

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Элементы коллекторно-дренажной сети и ее схемы

Оросительная система — это сложный комплекс инженерных сооружений, предназначенных для подачи оросительной воды из источника орошения на поля, управления водно-воздушным и водно-солевым режимом почвогрунтов и отвода воды и солей за пределы орошаемой территории. Коллекторно-дренажная сеть — та часть системы, которая поддерживает необходимый уровень грунтовых вод, создает нисходящие токи в почве, перехватывает напорный (восходящий) поток грунтовых вод, собирает и отводит излишние соли и воды с орошаемых земель. При этом дрены выполняют первые четыре функции, а коллекторы — главным образом транспортируют сбросные и дренажные воды и соли в водоприемники. В то же время следует учитывать, что коллекторы выполняют и чисто дренажные функции в зоне, непосредственно прилегающей к ним, а при слоистых грунтах, когда коллекторы прорезают хорошо проницаемый горизонт, и во всем межколлекторном пространстве.

Коллекторно-дренажная сеть состоит из следующего:

первичных (полевых) дрен;

дрен-собирателей;

коллекторов I, II и III порядка по восходящей (в зависимости от расхода) линии;

водоприемников.

Первичные дрены и дрены-собиратели, так же как и коллекторы I порядка, могут быть открыты и закрыты. Коллекторы II и III порядков обычно выполняются открытыми.

В зависимости от взаимного расположения оросительной, коллекторной сети и дренажа различают ряд принципиально возможных схем коллекторно-дренажной сети (рис. 22).

Характеристика этих схем приведена в таблице 9.

Как видно из схем, определяющим в расположении

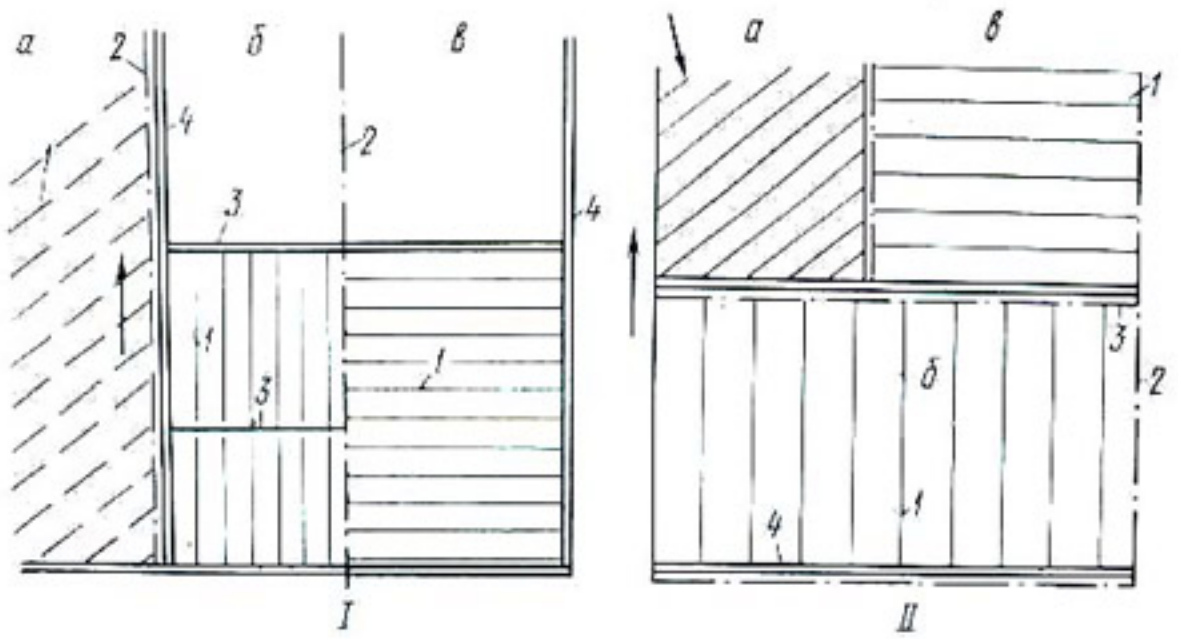


Рис. 22. Схема дренажа в сочетании с оросительной сетью:
I и *II* — продольная и поперечная схемы оросительной сети; *а* — схема дренажа «елочкой»; *б* и *в* — продольная и поперечная схемы дренажа; *1* — полевые дрены; *2* — коллектор; *3* — дрена-собиратель; *4* — ороситель участковый.

дренажной сети является ее направление, направление полива, характер рельефа и уклонов.

Продольные схемы I *б* и II *б* характеризуются большей длиной первичных дрен (от 0,5 до 2,5 км) и легко вписываются в любой рельеф. При этих схемах диаметры

Таблица 9. Характеристика схем коллекторно-дренажной сети в сочетании с оросительной сетью

№ схемы	Схема коллекторно-дренажной сети	Схема оросительной сети	Уклоны продольные	Характер рельефа	Направление полива
Iа	Косая	Продольная	Очень малые	Ровный	Любое
Iб	Продольная	»	Большие / Любые	Любой	Продольное
Iв	Поперечная	»	Любые / Малые	Ровный	Поперечное
IIб	Продольная	Поперечная	Большие / Малые	Любой	Продольное
IIв	Поперечная	»	Большие / Нулевые	Средний	Поперечное

Примечание. В числителе — уклоны в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном.

труб нарастают по уклону, по мере увеличения расходов. Тем не менее, при уклонах $>0{,}002$ это не приводит к удорожанию удельной стоимости дренажа на гектар вследствии того, что уменьшается число поперечных участков коллекторов, а глубина коллекторов остается в пределах 3,5—4 м, так как потребные уклоны дрен совпадают или даже меньше уклонов поверхности земли по их трассам. При меньших уклонах местности, наоборот, вследствие необходимости постепенного нарастания уклонов по сравнению с поверхностью земли стоимость продольной схемы становится на 20% выше поперечной, хотя удельная протяженность ее на 10% ниже. Следует отметить, что при продольной схеме *I б*, когда направления первичных дрен и большей части коллекторов совпадают с направлением наибольших уклонов местности, надежность работы коллекторов также выше, так как коллекторы, идущие вдоль горизонталей, всегда заиляются и разрушаются чаще, чем при продольном их расположении. Схема *II б* нежелательна из-за близкого размещения коллекторов и оросителей, а также из-за поперечной трассировки первых.

Поперечные схемы *I в* и *II в* в основном определяются направлением полива. Однако их следует рекомендовать только при малых поперечных уклонах, при относительно ровном рельефе и уклонах местности $<0{,}002$. В этом случае необходимо отметить их более высокую надежность в работе, так как при относительно небольшой длине дрен можно достичь оптимальных или близких к ним уклонов ($\geqslant 0{,}002$), что обеспечивает саморазмывающие скорости. Кроме того, нарушение в их работе ухудшает дренированность лишь небольшого поливного участка (7—9 га вместо 20—30 га при продольной схеме).

Размещение по косой схеме рекомендуется лишь при очень малых, почти нулевых, уклонах в поперечном направлении, когда за счет использования продольного уклона возможно небольшое заглубление дрен. Вообще эта схема неудобна, так как она обычно не совпадает с направлением поливов, что создает большие трудности при их проведении и обработке почв, особенно в первый период.

В последние годы появились отдельные работы по оптимизации схемы горизонтального дренажа орошаемых земель. Так, М. И. Каплинский, И. К. Дуюнов разработали методику расчета оптимальной длины дрен для про-

дольной (*I б*) схемы дренажа на основе анализа сметных стоимостей для Чуйской долины. Е. Д. Томин, А. Я. Шапочкин (1976) дали методику оптимизации дренажа при поперечной схеме по минимуму строительной стоимости с учетом различных технологий строительства. Хотя эти подходы представляют большой интерес и позволяют проектировщикам перейти от обычного вольного и интуитивного подхода к математически обоснованному, в то же время они не учитывают необходимости увязки сети коллекторов и дрен в плане с оросителями и соблюдения условий надежности и равномерности дренирования и управления водно-воздушным режимом.

Следует учитывать и мелиоративную эффективность различных схем дренажа. Сравнение эффективности действия продольного и поперечного дренажа было рассмотрено впервые Сен-Венаном в середине XIX в., который дал так называемую форму Винсента:

$$B = B_0 \varepsilon; \quad \varepsilon = \frac{1}{1 - i^2/i_0^2},$$

где B и B_0 — расстояние между дренами при поперечном и продольном их размещении; i и i_0 — уклон соответственно поверхности земли и грунтовых вод при входе в дрену.

На ее основе устанавливалось преимущество поперечного дренажа. Разработки Гергардта показали, что при уклонах $>0{,}004$ междренное расстояние при поперечном дренаже по сравнению с продольным можно делать на 30—40% больше. Это мнение укоренилось в зарубежной и даже отечественной литературе.

Х. А. Писарьков на основе своих расчетов сделал вывод, что поперечный дренаж всегда эффективнее продольного, но его эффективность начинает проявляться при уклонах $>0{,}005$ и дает значительный эффект при $i \geqslant 0{,}03$.

С. В. Аверьянов, использовав свое решение движения инфильтрационного потока по наклонному водоупору, решил эту задачу теоретически и доказал, что существенной разницы в осушительном действии поперечного и продольного дренажа нет. Поперечный дренаж имеет незначительное преимущество при размещении дрен на поверхности водоупора. С увеличением мощности водоносного пласта до T_0 действие дренажей выравнивается, а при мощности пласта $>T_0$ поперечный дренаж работает хуже продольного

$$T_0 = \frac{2h_0 q}{Ki^2},$$

где h_0 — наибольшее превышение поверхности грунтовых вод над плоскостью, соединяющей горизонты воды в дрене, м; q — интенсивность инфильтрации, м/сут; i — уклон водоупора; K — коэффициент фильтрации, м/сут.

Следует отметить, что все эти схемы, оптимизационные модели и теоретические методы размещения коллекторно-дренажной сети в плане применимы при однородных геоморфологических, гидрогеологических и почвенных условиях. Пестрота же и неоднородность этих условий требуют очень внимательного подхода как к назначению схемы дренажа, так и к выбору самих конструктивных его параметров. Необходимость этого принципа продемонстрируем на материалах исследований В. С. Седова и П. У. Умарова (САНИИРИ) в Каршинской степи. Здесь (совхоз № 14), в условиях сухой аллювиальной дельты, для гидрогеологического строения покровной толщи характерно наличие хорошо проницаемого песчано-галечникового слоя с $K \geqslant 3$ м/сут под верхним мелкоземным слоем суглинков с коэффициентами фильтрации 0,2—0,5 м/сут. Рельеф изрезанный. Тем не менее дрены были размещены в плане почти в однородных условиях (рис. 23). В результате большая часть дрен оказалась неработающей, а в понижении, где дрены прорезали подстилающий горизонт, — перегруженными. В данном случае более правильно было бы сгустить дрены вблизи тальвегов и разредить их вверху. Дренаж целесообразно размещать на основе моделирования на аналоговых машинах, например БУСЭ-70.

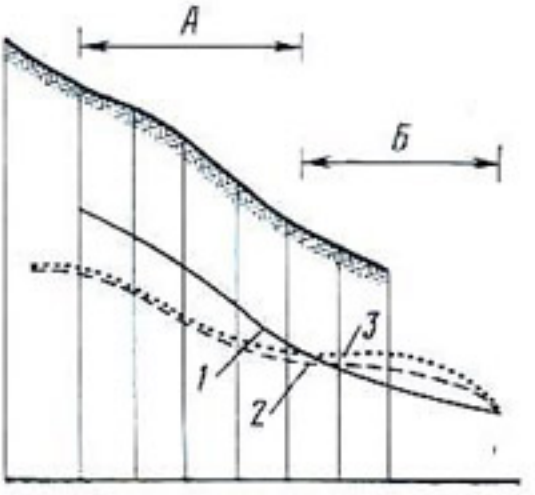


Рис. 23. Схема дрены в совхозе № 14 Каршинской степи:

А и *Б* — неработающая и работающая части дрены; *1* — дно дрены Д-2; *2* — уровень грунтовых вод; *3* — пьезометрический уровень воды.

Дренаж обязательно должен быть увязан с оросительной сетью. В главе 2 была показана увязка дренажа с техникой полива для получения равномерного промывного эффекта. Увязка с оросительной сетью должна учитывать, кроме этих факторов, еще и ряд

других. В частности, нежелательно приближение дренажа к открытым каналам, особенно в суффозионно-опасных, например гипсоносных грунтах. Это не только способствует увеличению фильтрации из каналов, но и может привести к аварийной ситуации в результате механической суффозии. Расположение закрытых дрен с трубчатой и лотковой сетью не лимитируется, так как взаимное влияние их незначительно.

Конструкции закрытого горизонтального дренажа

Открытые дрены — несовершенный тип дренажа, поэтому ниже рассмотрены только конструкции закрытого горизонтального дренажа.

Основные конструктивные элементы закрытого горизонтального дренажа — трубы, фильтровая обсыпка, обратная засыпка, колодцы, устьевые сооружения. Трубчатая часть дренажа служит для приема дренажных вод из фильтра (грунта) и транспортировки их в коллекторы или дренособиратели. Она может выполняться из гончарных (керамических), асбестоцементных, полимерных, бетонных и других труб. Фильтровая обсыпка предотвращает заиление труб и суффозию дренируемого грунта, а также обеспечивает достаточную водоприемную способность. При отсутствии фильтра или недостаточном его периметре в горизонтальных дренах возникает явление нависания. Фильтровая обсыпка устраивается из гравийно-песчаных материалов, естественных или специально отсортированных, или из различных синтетических тканей и стекловолокон, а также из полимерных материалов с пористой структурой.

В последнее время начато применение трубофильтров, совмещающих транспортирующие функции труб с фильтрующими свойствами за счет пористости стенок. Они позволяют уменьшить объем фильтра, а в грунтах с $K \geqslant 1$ м/сут — отказаться вообще от фильтра, либо использовать для этих целей местные, в том числе барханные пески с K до 2,5 м/сут.

Обратная засыпка — важнейший элемент, влияющий на интенсивность и эффективность работы дренажа. Известно, что в осушительном дренаже обратная засыпка, особенно в подзолистых и структурных грунтах, служит основным путем попадания воды в дренаж. Ф. Р. Зай-

дельман (1975), например, приводит данные Л. И. Климко по Калининградской области, где 71% воды попадает через пахотный слой и обратную засыпку и только 29% — через подпахотные горизонты. На орошаемых землях зачастую наблюдается обратная картина. Учитывая наличие в почвогрунтах орошаемых земель илистых или глинистых частиц с мелкодисперсной структурой, авторами установлен экранирующий эффект обратной засыпки. Он проявляется в создании над дреной водопроницаемого слоя вследствие гидравлической классификации мелких частиц грунта (Духовный, 1973). Аналогичные явления отмечают И. В. Кононов и В. П. Насиковский (1974).

Для борьбы с этим явлением в САНИИРИ (А. А. Адылов, Х. И. Якубов) предложено оструктуривать грунт обратной засыпки добавкой полимерных агрегатирующих веществ типа К-4, К-9, полиакриламида вблизи самой трубы слоем 30—40 см над ней.

Одно из наиболее уязвимых мест закрытого дренажа — его колодцы. Смотровые колодцы устанавливают через 200—240 м вдоль трассы дрены. Назначение их — контроль за состоянием дренажа, улавливание мелких наносов в донных камерах. Кроме того, через колодцы проводится очистка и промывка дренажа.

Опыт показал, что колодцы, особенно составной конструкции (из железобетонных колец диаметром 1 м), являются самым опасным местом. Через многочисленные стыки колец, стыки донной плиты с кольцом и нижнего кольца с дренажными трубами, заделываемые на месте вручную в неудобных условиях, разрыхленный грунт обратной засыпки попадает в дрену.

Замочка грунта вокруг колодца, предложенная институтом «Средазгипроводхлопок», не смогла предотвратить проникновение грунта в колодцы. Поэтому сейчас осуществлен ряд конструктивных изменений.

Начальные колодцы на дренах выполняют из асбестоцементной трубы диаметром 156 мм, в которую на полигоне заделывают гончарную трубу. Дно бетонируют. Такой колодец фиксирует начало дрены. Кроме того, он позволяет после строительства и в процессе эксплуатации промывать дрену под небольшим напором.

Промежуточные колодцы выполняют с дном из цельного блока диаметром 0,8 м, высотой 4 м и трубой для подключения к дренажной линии. Они служат для осмотров и очистки дрен.

При поперечной схеме дренажа, при которой длина дрен 400—500 м, промежуточный колодец не устраивают, так как практика доказала невозможность очистки дрен через колодцы в этих условиях. Для промывки дренажной линии специальным агрегатом приходится вскрывать дрену шурфами, через 150 м, начиная от ее устья.

Уязвимым также местом являются устья дрен. Объясняется это тем, что при включении в коллектор глубиной 4—5 м создается базис эрозии для поверхностных вод. Они устремляются на разрыхленную засыпку труб, разрушая участки на расстоянии 30—40 м от устья. При значительных расходах из дрены эрозия может идти от дренажных вод.

Для борьбы с этими явлениями институт «Средазгипроводхлопок» предложил, а Голодностепстрой осуществил уплотнение устья замочкой. Этот метод не везде дает удовлетворительные результаты. Поэтому в 1966 г. Голодностепстрой (В. А. Духовный, Л. Л. Дюндин и др.) предложили строить тупиковые дрены с последующим выполнением устьевого отверстия одним из известных методов. Первоначально устье пробивали пробойником П-2001. Этот способ не давал прямолинейного устья. В последующем, по предложению треста «Дренажстрой», освоили гидравлическую пробивку устья меньшего сечения с помощью водяных струй высокого давления. Теперь этот способ успешно применяют при строительстве устьев пластмассового дренажа, уложенного бестраншейным способом.

Конструкции закрытого горизонтального дренажа могут быть систематизированы по сочетанию труб и фильтровой обсыпки, по видам труб и их перфорации и, кроме того, по напору в дрене (рис. 24).

Дрены с фильтровой обсыпкой из гравийно-песчаных материалов выполняются в основном с центральным расположением трубы относительно фильтра (рис. 24, *а*). При этом ложе под засыпку могут делать полукруглым. Однако строят и такие дрены, когда трубы приподняты внутри фильтра или лежат на его поверхности (рис. 24, *б* и *в*). Такие конструкции основываются на том, что приток к дрене в основном идет в нижней трети трубы, поэтому обсыпку из фильтрового материала сверху не делают. Это неправильно, так как в отдельные периоды работы дренажа, особенно в начальный период после строительства и при промывках, интенсивное поступле-

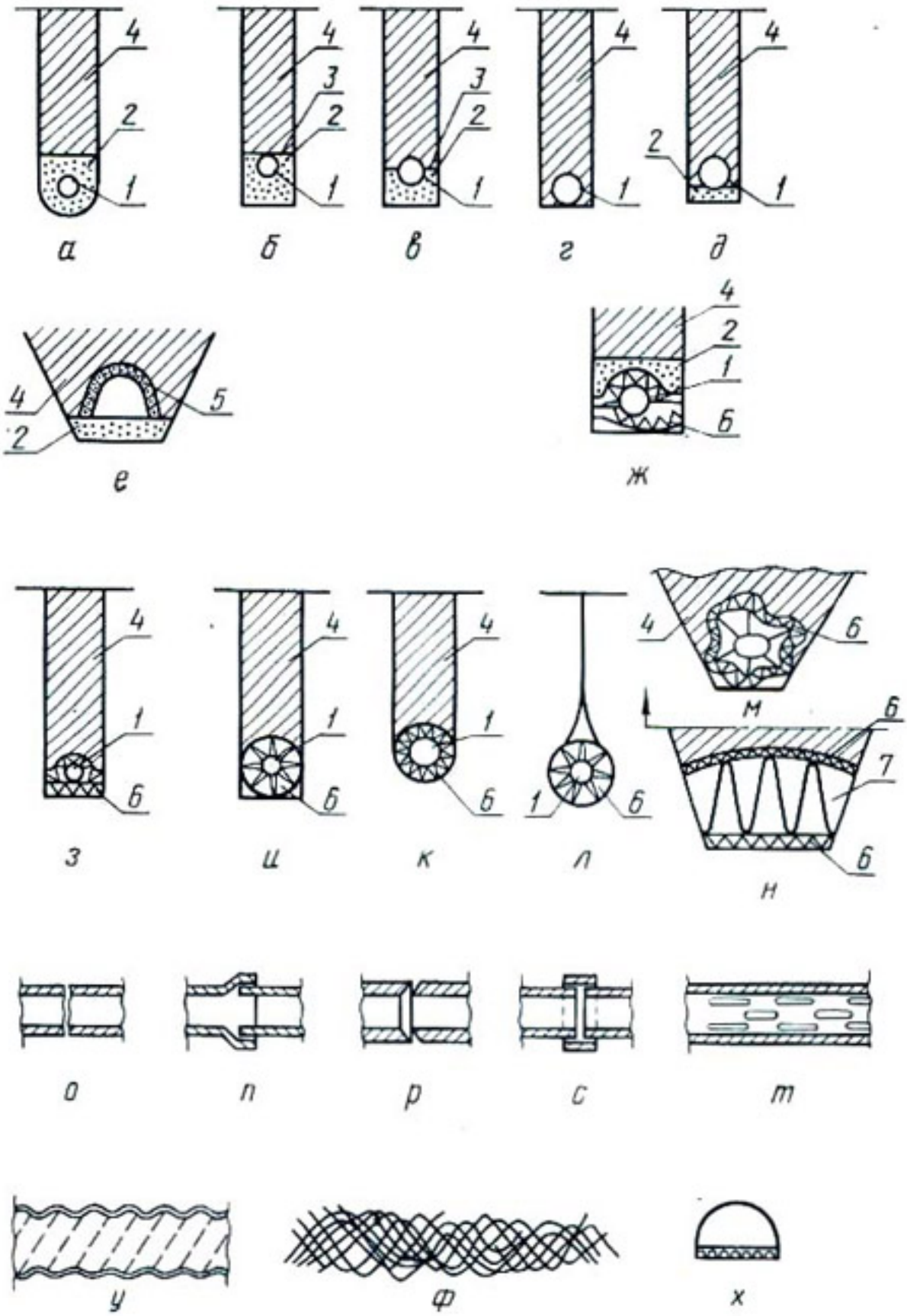


Рис. 24. Конструкция дренажа:

1 — труба; *2* — фильтрующая песчано-гравийная обсыпка; *3* — пленка; *4* — обратная засыпка; *5* — лоток; *6* — фильтрующий элемент; *7* — фильтрующий ребристый элемент из поролона.

ние в дрену происходит и сверху. Дрены покрывали пленкой, чтобы предохранить их от инфильтрационной воды, поступающей сверху. Однако эти попытки были не всегда удачными.

При применении трубофильтров и при строительстве в песчаных грунтах с коэффициентом фильтрации более 1 м/сут в первом случае и более 3—5 м/сут во втором возможна укладка труб прямо на грунт (рис. 24, *г*) или на подстилающий слой из фильтрующего материала (рис. 24, *д*).

Особое место среди конструкций с фильтровой обсыпкой занимают дрены, в которых нижняя водоприемная часть выполнена из фильтрового материала, а сверху устанавливается лоток коробчатого, параболического или полуциркульного сечения. Такие конструкции рекомендуются в СССР и за рубежом для труб больших диаметров и больших расходов коллекторов и дрен. Имеются разновидности этих конструкций, отличающиеся формой труб, наличием в них жесткости и др. Однако круглая труба все-таки является наиболее экономичным и дешевым профилем для дренажа, за исключением отдельных особых случаев (рис. 24, *е*).

Дрены с фильтрами из минеральных материалов могут выполняться с двухслойным плоским фильтром (рис. 24, *з*), с круглой обмоткой, уложенной в прямоугольную (рис. 24, *и*) и полуциркулярную (рис. 24, *к*) траншеи. Конструкции траншейного способа дренирования пригодны для грунтов с большими коэффициентами фильтрации ($>0{,}6$ м/сут). При меньших коэффициентах фильтрации особенно резко проявляется эффект экранирования. Поэтому в этих условиях более целесообразно укладывать такие дрены бестраншейным способом, для которого характерен контакт естественного грунта с фильтровой обсыпкой (рис. 24, *л*). Имеются и другие, пока не нашедшие применения, конструкции. Например, конструкция типа «труба в трубе» (СССР). В ней транспортирующая труба укладывается в наружную трубу из пористого материала. Японские ученые предлагают применять многореберную дрену (рис. 24, *м*) с обкладкой по патенту США (рис. 24, *н*).

Конструкция дрены с применением развитых фильтрующих элементов (рис. 24, *н*) из поролона в сочетании с профилированным сводом из полиэтилена находится в стадии производственной проверки (УкрНИИГиМ).

Промежуточное место между конструкциями дрен с фильтровой обсыпкой и фильтрами из минеральных материалов занимают дрены с фильтром из минераловатных плит с дополнительной обсыпкой гравийно-песчаным материалом сверху (рис. 24, *ж*).

По способу поступления воды можно выделить трубы: фильтрующие через стык, подразделяющиеся по виду стыка на гладкие (рис. 24, *о*), раструбные (рис. 24, *п*), фасонные (рис. 24, *р*) и муфтовые (рис. 24, *с*); фильтрующие через тело труб (трубофильтры); трубы с перфорацией; гладкие с дырчатой или щелевой перфорацией различного вида (рис. 24, *т*). Раструбные и муфтовые трубы являются лучшим видом там, где возможны осадки после их укладки.

Отдельно следует рассматривать полимерные трубы, которые могут быть гофрированные и гладкие, витые (рис. 24, *у*), с перекрещивающимися стыками (рис. 24, *ф*) и с фильтровым плоским элементом (рис. 24, *х*).

Большинство дрен работает под действием напора воды, создаваемого разницей между уровнем грунтовых вод и уровнем воды в дрене. Б. М. Дегтярев и В. А. Каланта-ев разработали системы вакуумного дренажа, в котором действующий напор над дреной равен

$$h_д = h + \frac{P_в}{\gamma},$$

где h — геометрический напор; $p_в$ — вакуум, создаваемый в дрене; γ — средняя плотность воды.

Авторами испытан такой дренаж на площади около 200 га в Чарджоуской области в песчаных грунтах. При этом вакуум создается в период максимальной нагрузки на дрены обычно во время промывок. Применимость вакуумного дренажа в суглинистых и даже супесчаных пылеватых грунтах сомнительна, так как при этом трудно постоянно поддерживать над дреной фазовую границу капиллярной зоны в виде экрана на высоте, равной, по данным авторов, 70 см и более.

Фильтры из несвязных материалов

При проектировании фильтров закрытого горизонтального дренажа должны учитываться свойства дренируемого грунта — связность, средняя плотность, влажность при укладке и др.

При пестром литологическом строении фильтровой материал подбирается по наиболее слабому в фильтрационном отношении дренируемому грунту.

Изучением фильтрационных свойств связных материалов посвящены исследования В. С. Истоминой, В. В. Буренковой, В. Н. Жиленкова, Г. Х. Праведного, Г. В. Мишуровой, Н. А. Цветковой и С. И. Сторожук и др.

Отличительная особенность связных грунтов — наличие значительных сил сцепления (прилипания) между частицами и агрегатами. К таким грунтам относятся глины с числом пластичности более 17, суглинки — менее 17, супеси — менее 7, пылеватые и мелкопесчаные грунты, содержащие более 20% пылеватой фракции ($d<0{,}005$ мм при определении зернового состава методом сито-пипетки). Последние грунты можно отнести к тощим супесям, однако установить число пластичности данных грунтов практически не удается из-за несовершенства методики его определения.

В зоне контакта с зернами фильтра отдельные частицы и агрегаты связного грунта находятся под действием силы собственного веса G, силы гидродинамического давления фильтрационного потока I и противоположно им направленной силы прилипания (сцепления) N_0, которая равна

$$N_0 = G + I. \tag{115}$$

Силы прилипания между частицами пропорциональны поверхностной энергии прилипания, зависящей от коллоидных частиц и пылеватых фракций, расстояния между отдельными частицами и их агрегатами, то есть средней плотности, их первоначальной влажности, химического состава, минерализации грунтовых вод, температуры и др. В случае, если диаметры пор фильтра таковы, что в зоне контакта со связными грунтами нарушается их сцепление, а тем самым условие равновесия, в связных грунтах начинает развиваться деформация отслаивания. Следовательно, если максимальный диаметр пор фильтрового материала меньше расчетного, зависящего от категории дренируемого грунта, то деформации отслаивания не будет:

$$D_0^{\max} < D_0.$$

Значение $D_0^{\max}$ определяется по зависимости М. П. Павчича:

$$D_0^{max} = \varkappa C \frac{\gamma_{\text{ф}}}{1-\gamma_{\text{ф}}} D_{17}, \qquad (116)$$

где $\chi = 1 + 0{,}5\eta_{\text{ф}}$; $C = 0{,}455 \sqrt[6]{\gamma_{\text{ф}}}$; $\eta_{\text{ф}}$ — коэффициент неоднородности грунта.

Изучая деформацию отслаивания связных грунтов с числом пластичности более 7 при влажности в интервале пластичности, Г. Х. Праведный на основе теоретических проработок и данных опытов при отсутствии и наличии фильтрационного потока получил следующую формулу для определения расчетного диаметра пор:

$$D_0^{\text{р}} = \sqrt{\frac{0{,}34}{\psi I_{\text{р}} + \cos\Theta}}, \qquad (117)$$

которая верна при средней плотности грунтов

$$\gamma_{\text{об}} \geqslant \frac{\gamma_{\text{уд}}}{1 + \varepsilon_m}, \qquad (118)$$

где $\gamma_{\text{об}}$ — средняя плотность грунта; $\gamma_{\text{уд}}$ — плотность грунта; $J_{\text{р}}$ — расчетный градиент напора в дренируемом грунте на границе с фильтром, определяемым методом ЭГДА; ε_m — коэффициент пористости при W_t; $\varepsilon_m = \gamma_{\text{уд}} W_t / \gamma_{\text{ь}} 100$; ψ — эмпирический коэффициент, определяемый по формуле, полученной на основании данных Г. Х. Праведного: $\psi = 0{,}0076\ (16{,}6 - J_{\text{р}})\ (J_{\text{р}} - 1)$; Θ — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести (с запасом можно принять $\cos\Theta = 1$).

Изучение деформации супесчаных и пылеватых грунтов при отсутствии и наличии фильтрационного потока на контакте с фильтрами из отдельных фракций проводилось в САНИИРИ (С. И. Сторожук) в приборах Дарси и специальных установках, где диаметр пор моделировался отверстиями в дне цилиндров. Скважность этих отверстий составляла 25%.

Исследования показали, что с увеличением средней плотности образца и первоначальной влажности деформация отслаивания развивается при больших диаметрах пор фильтров.

Отслаивание пылеватых грунтов начинало развиваться при диаметре пор фильтра примерно в 2 раза меньшем, чем у супесей с $W_{\text{п}} > 3$.

На основе экспериментов получены зависимости для определения расчетного диаметра пор фильтра:

для суглинков

$$D_0^p = \sqrt{\frac{0{,}17}{I_{max}^p + \cos\theta}}, \qquad (119)$$

для супесей с $W_п > 3$

$$D_0^p = \sqrt{\frac{0{,}1}{I_{max}^p + \cos\theta}}, \qquad (120)$$

для пылеватых мелкопесчаных грунтов, содержащих больше 20% частиц диаметром менее 0,05 мм, и супесей с числом пластичности $W_п < 2$

$$D_0^p = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{0{,}025}{I_{max}^p + \cos\theta}}. \qquad (121)$$

Предложенные зависимости были проверены лабораторными опытами с искусственными и естественными смесями при наличии фильтрационного потока.

По результатам экспериментов в качестве фильтров, защищающих слабосвязные грунты, рекомендуются те естественные карьерные смеси, при использовании которых соблюдается выполнение следующих трех условий:

постоянство коэффициентов фильтрации грунта и фильтра при совместном и раздельном испытаниях;

отсутствие фильтрационных деформаций при напорных градиентах в грунте в несколько раз больших, чем максимально возможные в придренной зоне;

постоянство коэффициента фильтрации контактного слоя.

Исследования показали, что при $\gamma \geqslant 1{,}2$ г/см^3 и $W > 12\%$ дренируемые грунты не отслаивались при выполнении зависимостей (119—121). Если эти условия не выполняются, в зоне контакта с фильтром в дренируемом грунте начинают развиваться деформации отслаивания. Частицы дренируемого грунта проникают через фильтр в полость трубы. Постепенно частицы оседают в фильтре и кольматируют его. В результате дренаж выходит из строя.

Выполненные отделом дренажа САНИИРИ (Г. Е. Батурин) натурные исследования закрытого горизонтального дренажа в Голодной степи показали, что при соблюдении основных требований, предъявляемых к фильтру, зерновой состав через 2—3 года практически оставался без изменения, дрены работали удовлетворительно.

Допускается использование в фильтровой обсыпке суффозионных карьерных смесей, если за счет разницы в коэффициентах фильтрации дренируемого грунта и фильтра градиенты, возникающие в фильтре, незначительны. При этом коэффициент неоднородности фильтра может быть $5 \leqslant \frac{D_{60}}{D_{10}} \leqslant 35$, если дренируемый грунт слабосвязный и $5 \leqslant \frac{D_{60}}{D_{10}} \leqslant 50$ в случае суглинистых грунтов.

При использовании смеси с большими коэффициентами неоднородности возможно расслаивание грунта. По данным ВОДГЕО, расслаивание происходит по фракции крупностью 1 мм, если мелкозернистая часть — слабосвязные грунты или мелкозернистые пески.

Учитывая особенности производства работ, фильтр мелиоративного дренажа делается однослойным. Максимальная крупность фракции 40—50 мм.

В качестве фильтровой обсыпки могут применяться естественные песчаные, песчано-гравийные и гравийно-песчаные смеси. В частности, при соответствующем подборе и расположении перфорационных отверстий (в нижней трети трубы) допускается использование несуффозионных барханных песков. Эти пески по зерновому составу являются нижней границей грунтов, пригодных в обсыпку. Минимально допустимая толщина фильтра

$$T = (5 \div 7) D_{85}, \qquad (122)$$

где D_{85} — диаметр частиц, содержание которых в фильтровой смеси менее 85 % по весу.

Водопроницаемость фильтра $K_ф$ должна настолько превышать водопроницаемость дренируемого грунта K, чтобы возникающие в фильтре потери напора были незначительны по сравнению с действующим напором. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

при дренировании связных грунтов $\frac{K_ф}{K} \geqslant 10$,

при дренировании несвязных грунтов $\frac{K_ф}{K} \geqslant 5$.

Пример подбора фильтра для связных грунтов приведен на рисунке 25.

В 1974 г. институтом «Средазгипроводхлопок» (Ф. В. Серебренников) и САНИИРИ (С. И. Сторожук) были разработаны «Методические указания по проекти-

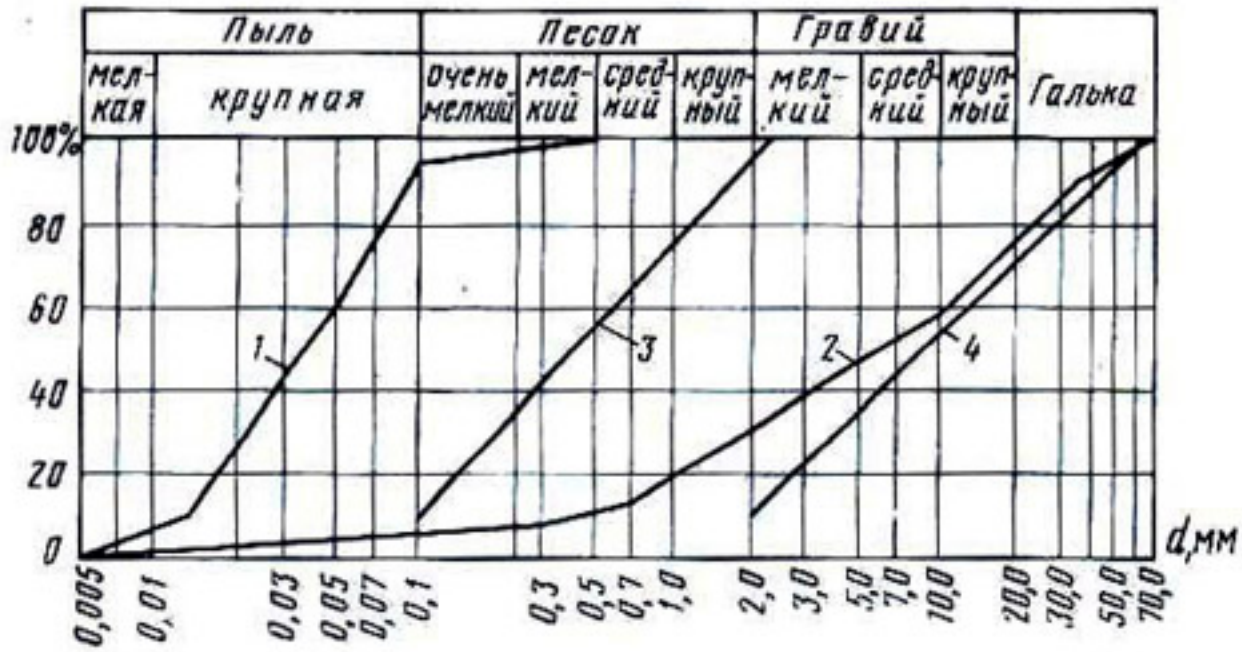


Рис. 25. Проектирование зерновых составов фильтров:

1 — грунт Голодной степи; *2* — карьерная смесь; *3* — нижняя предельная кривая; *4* — верхняя предельная кривая.

рованию фильтров из несвязных грунтов для закрытого горизонтального дренажа».

Исследованиям по подбору фильтров, защищающих несвязные материалы, посвящены работы С. А. Лубочкова, В. Н. Кондратьева, А. Н. Патрашева, И. П. Павчича и др.

К несвязным относятся грунты, у которых сцепление между частицами незначительно: пески (от мелкозернистых до крупнозернистых), гравий, галечники, щебень и другие более крупные материалы.

Зависимости, используемые при проектировании фильтров, основаны на условии непросыпаемости частиц дренируемого грунта в поры фильтра.

Допускается, что частицы, содержащиеся в дренируемом грунте до 3—5%, могут выноситься в полость дренажной трубы.

Методика расчета фильтров из несвязных материалов, наиболее приемлемая для проектирования фильтров закрытого горизонтального дренажа, закладываемого в несвязных грунтах, разработана во ВНИИГ М. П. Павчичем и в ее основу положено условие непросыпаемости:

$$\eta_м \leqslant \eta_м^{доп}, \qquad (123)$$

где $\eta_м$ — фактический междуслойный коэффициент; $\eta_м^{доп}$ — допустимый междуслойный коэффициент.

Допустимый междуслойный коэффициент вычисляется по формуле

$$\eta_{\text{м}}^{\text{доп}} = \frac{1}{C_1} \quad \frac{1-n_{\text{ф}}}{n_{\text{ф}}}, \tag{124}$$

где $n_{\text{ф}}$ - пористость карьерного грунта, доля единицы;
$C_1 = 0{,}252 \sqrt[n]{\eta_{\text{ф}}}$; $\eta^{\text{ф}}$ — коэффициент неоднородности карьерного грунта.

Фактический междуслойный коэффициент определяется по зависимости:

$$\eta_{\text{м}} = \frac{D_{17}}{d_{\text{сг}}}, \tag{125}$$

где $d_{\text{сг}}$ — диаметр сводообразующих частиц, значение которого берется с кривой зернового состава дренируемого грунта в зависимости от процентного содержания сводообразующих частиц $P_{\text{сг}}$.

$$P_{\text{сг}} = P_1 \left[(5B-5) \frac{\eta_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}}-1} \right]^{\frac{1}{x}}, \tag{126}$$

B — коэффициент, учитывающий размер пор в зависимости от раскладки части грунтов; $B=3\div5$ — для естественных карьерных смесей; $B=5\div9$ — для щебенистого материала; $x=1+1{,}28\lg\eta_{\text{г}}$; $\eta_{\text{г}}$ — коэффициент неоднородности дренируемого грунта.

При дренировании несвязных грунтов применение фильтров суффозионного состава не допускается.

При проектировании зернового состава фильтров на основе механического состава, установленных выше коэффициентов неоднородности и допустимого содержания частиц $<0{,}1$ мм строятся верхние и нижние проектные кривые зернового состава (рис. 25).

Фильтры из искусственных волокнистых материалов

Искусственные волокнистые материалы, позволяющие механизировать процесс строительства, а следовательно, снизить его стоимость, находят широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом (США, Франция, ФРГ, Египет и др.).

Разработанная в СССР технология изготовления искусственных материалов на основе стекла и базальта позволяет выпускать тканые и нетканые волокнистые материалы, обладающие широким диапазоном пропускной способности.

Изучению физико-механических фильтрационных и защитных свойств из стеклянного и базальтового волокна посвящены работы В. М. Зубца, А. И. Мурашко, Н. Г. Пивовара, Е. Г. Сапожникова, В. И. Антонова, Е. С. Семеринова, Г. Я. Сеглия, Э. Х. Эглия, И. Ф. Юрченко и др.

В отличие от песчаных и песчано-гравийных материалов водопроницаемость искусственных волокнистых материалов зависит от давления P на материал и диаметра элементарных волокон $d_{дв}$.

На основе изучения фильтрационно-кольматационных и физико-механических свойств фильтров из искусственных волокнистых материалов были составлены руководства и методики по защите дренажа от заиления. Инструктивные материалы разработаны в БелНИИМиВХ А. И. Мурашко и Е. Г. Сапожниковым, в ЛатНИИГиМ Г. Я. Сеглий и Э. Х. Эглий, в СевНИИГиМ Н. И. Хрисановым и А. В. Мясковым.

За последние годы наша промышленность значительно расширила ассортимент искусственных волокнистых материалов на основе хлорина, нитрона, полихлорвинила и др. Использовать рекомендуется базальтовые и стеклянные волокна, волокнистые материалы, войлоки I-Ф, МС-50, ткани ТСТ, ТС(б)-7, ТСФР(6), Э-0,08, Э-0,06, 8481-61.

Обладая малой толщиной, фильтровый материал практически не увеличивает эффективный диаметр дрены. Это в условиях грунтов с низкой водоотдачей приводит к необходимости уменьшить междренья для обеспечения необходимого дренажного модуля.

Искусственный материал подбирают из условия его некольматируемости. Это будет обеспечено, если (Мурашко, 1973)

$$D_0^{ф} \geqslant (3{,}3 - 4{,}4)\, d_{сl}^{max}, \qquad (127)$$

где $D_0^{ф}$ — средний гидравлический диаметр пор элементарного искусственного материала;

$$D_0^{ф} = 0{,}17 \frac{n}{1-n} \sqrt{B};$$

$d_{сl}^{max}$ — максимальный диаметр суффозионных частиц грунта, фильтра;

$$d_{сl}^{max} = 0{,}35 \frac{n}{1-n}\, d_{17} (1 + 0{,}05\, \eta) \sqrt[6]{\eta}, \qquad (128)$$

$n = 0{,}4-0{,}1 \lg\eta$; η — коэффициент неоднородности грунта, $\eta = d_{60}/d_{10}$.

Дренаж с фильтрами из искусственных материалов как из-за консолидации грунта, так и частичной суффозии (кольматации) в начале эксплуатации существенно уменьшает расход. Затем он стабилизируется. Причем, чем больше проницаемость материала, тем выше его кольматируемость в условиях слабосвязных грунтов.

Коэффициент фильтрации искусственных материалов с учетом нагрузки грунта не должен превышать 25—30 м/с.

Исходя из условия создания незначительных градиентов при входе в трубы, коэффициент фильтрации искусственного фильтра $K_ф$ должен превышать водопроницаемость слабосвязных и связных грунтов

$$\frac{K_ф}{K} \geqslant 20,$$

несвязных

$$\frac{K_ф}{K} \geqslant 5.$$

Фильтровой материал подбирают по графику зависимости $K_ф = f(P, d_{эк})$.

Подбор типа ткани для оболочки войлочного фильтра производится по формуле

$$K_{тр} = \frac{bK_ф}{h_ф}; \qquad (129)$$

где $K_{тр}$ — требуемый коэффициент; $K_ф$ — коэффициент, характеризующий водопроницаемость тканых, прошитых и клеевых материалов, подобранных так, чтобы их сопротивление составило не более 5—10% сопротивления войлочной части фильтра; b — коэффициент, равный 10—20 (большая величина принимается для глубокого дренажа); $h_ф$ — толщина фильтра под расчетной нагрузкой ($0{,}02 < P < 0{,}3$ МПа).

Найдя $K_{тр}$, по нижеприведенным данным подбираем близкое большее значение коэффициента, которому соответствует определенный материал.

Стеклохолст жесткий (ВТУ 77—63)	1,3
Сетка стеклянная тканая (ГОСТ 8481—61)	0,85
Стекловолокнистый холст (СТУ 77-10-218—65)	0,75

Выбрав материал фильтра, найдя его водопроницаемость и пригодность для конкретных условий, вычисляем толщину фильтра h_i по формуле

$$h_i = \frac{h_и}{C}, \qquad (130)$$

где $h_н$ — исходная толщина фильтра в заводской упаковке; $C=\gamma_t/\gamma_н$ отношение средней плотности фильтра при расчетном давлении к исходной и средней плотности.

В нашей стране трубофильтры с круговой гравийной обсыпкой впервые были уложены при осушении земель под Ленинградом. С тех пор они находят применение при строительстве мелиоративного дренажа в СССР.

Для изготовления трубофильтров могут быть использованы практически любые местные строительные материалы: гравий, щебень, песок, керамзит, отходы сжигания угля и др. Производство трубофильтров может быть организовано вблизи строительства, что существенно снижает затраты.

В качестве вяжущего применяют различные клеи, цемент, битумы, органические вяжущие и др. Выбор вяжущего должен определяться агрессивностью вод. В частности, для территории Средней Азии наилучшее вяжущее — глиноземистый цемент.

Основной фильтрационный показатель трубофильтров — средний диаметр пор $D_0^{ср}$. Он определяется по фотографии плоских шлифов с последующей обработкой методом статистического анализа. Значение $D_0^{ср}$ соответствует 85—90% обеспеченности по кривой распределения пор.

Связь среднего диаметра пор с первоначальной водопроницаемостью трубофильтров установлена С. И. Сторожук, З. Ф. Джумаходжаевым (рис. 26). Полученная зависимость может быть использована также для установления среднестатического диаметра трубофильтров в заводских условиях (экспресс-метод).

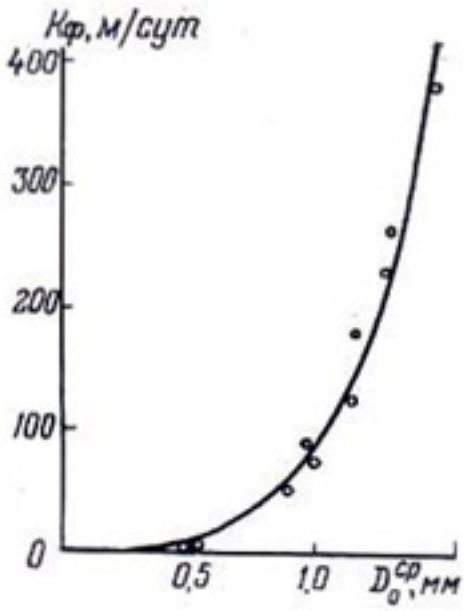


Рис. 26. График зависимости коэффициента фильтрации от среднего диаметра пор.

Фильтрационный расчет трубофильтров, не зависящей от способа изготовления, состава заполнителя и связующего, разработан в САНИИРИ (С. И. Сторожук). Расчетом определяется необходимость фильтровой обсыпки и ее зерновой состав. Фильтрационный расчет основан на следующих принципах:

поверхность стенок трубофильтров по размерам пор и пористости идентична поверхности фильтра из несвязных материалов. Поэтому на контакте дренируемых грунтов и трубофильтров возможно развитие тех же фильтрационных деформаций, что и на контакте с песчаными, песчано-гравийными фильтрами.

Данный довод подтверждается результатами исследований контакта трубофильтров с глинистыми (АзНИИГиМ), суглинистыми (УкрНИИГиМ), суглинистыми, супесчаными, пылеватыми и песчаными (САНИИРИ), с несвязными грунтами (ВНИИГ, ВодГЕО и др.);

структура стенок трубофильтров резко отличается от фильтрового несвязного материала наличием тупиковых и защемленных пор, в которые может просыпаться грунт (С. К. Абрамов, Н. Д. Бессонов, В. М. Гаврилко, И. С. Николодышев). Часть грунта, которая просыпалась в поры трубофильтров, не должна способствовать кольматажу порового пространства, а оставшаяся на поверхности должна обеспечивать прочность дренируемого грунта.

Для обеспечения фильтрационной прочности связных грунтов необходимо, чтобы среднестатический диаметр пор $D_0^{ср}$ трубофильтра был меньше расчетного $D_0^р$, который равен

$$D_0^р = \sqrt{\frac{A}{I + \cos\theta}}. \qquad (131)$$

В зависимости от вида грунта коэффициент A имеет следующие значения:

суглинки и глины при средней плотности более 1,55 т/м³ и влажность в интервале пластичности	0,34
легкие суглинки	0,17
супеси	0,1
пылеватые грунты	0,025

Если это условие не выполняется, то необходима фильтровая обсыпка.

Фильтровая обсыпка не применяется при строительстве дренажа из трубофильтров, укладываемых в несвязные грунты с коэффициентом фильтрации более 2 м/сут.

Эксперименты показали, что трубофильтры не заиляются, если просыпавшаяся часть грунта несуффозионная. Поэтому, исходя из условия просыпаемости, определяют, какие фракции несвязного (А. Н. Патрашев) материала

проникнут в поры трубофильтра:

$$D_к \leqslant \frac{D_0^{ср}}{1,8}, \qquad (132)$$

где $D_к$ — наибольший диаметр фракций карьерной смеси, которые просыпятся в поры фильтра; $D_0^{ср}$ —среднестатический диаметр пор трубофильтра.

По зависимости И. П. Павчича

$$\frac{D_3}{D_{17}} \geqslant (0,32 + 0,016\,\eta_{ф})\,\frac{n_ф}{1-n_ф}\sqrt[6]{\eta_ф} \qquad (133)$$

определяется зерновой состав просыпавшегося грунта и проверяется его суффозионная устойчивость.

Затем рассчитывается зерновой состав несвязного грунта, оставшегося на поверхности трубофильтров, и определяется его пригодность в качестве фильтра в зависимости от категории дренируемого грунта по выражению (131). Максимальный диаметр пор фильтра вычисляется по формуле (116).

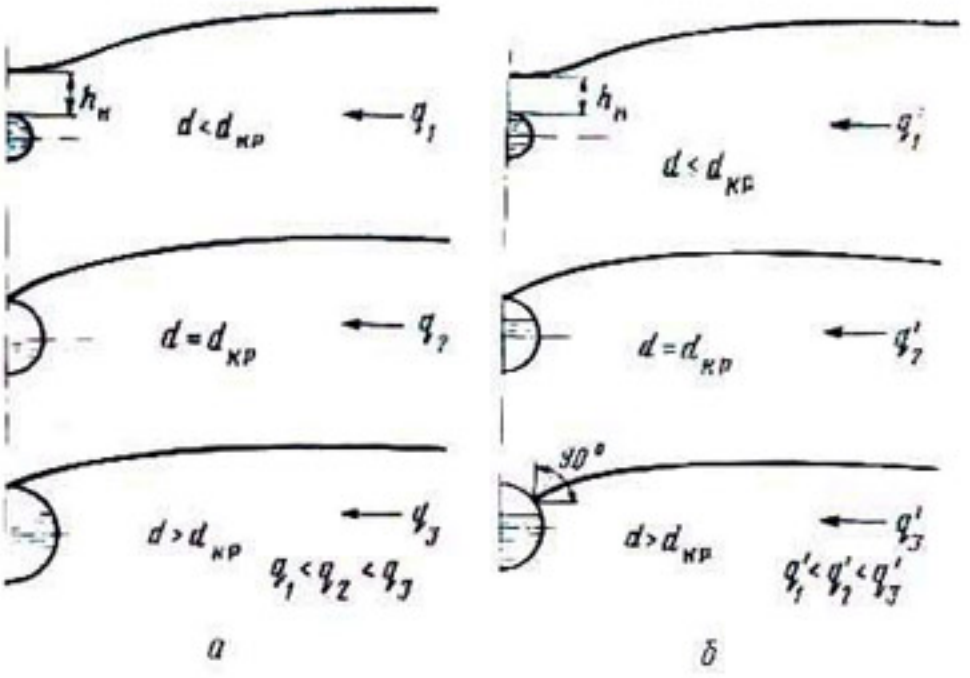
Водоприемная способность закрытого дренажа. Виды несовершенства

Прежде чем изложить вопрос о количественном определении водоприемной способности дренажных конструкций, необходимо остановиться на характерных случаях фильтрации грунтовой воды в придренной зоне и непосредственно в дрене.

С. Ф. Аверьянов (1959) отметил, что нависание грунтовой воды над дреной может быть под действием трех факторов: подпора в дрене, когда $P > P_{атм}$ (P — давление в дрене); недостаточного размера дрены: $d < d_{кр}$; дополнительных сопротивлений на вход воды в дрену.

Влияние размера дрены на положение депрессионной кривой в придренной зоне рассмотрено В. В. Ведерниковым (1939). Он указал различные случаи расположения свободной поверхности у дрены, водоприемная поверхность которой совершенна в смысле фильтрации в нее грунтовой воды (рис. 27).

Данные С. Ф. Аверьянова и В. В. Ведерникова позволили схематизировать возможные случаи фильтрации грунтовой воды в закрытую дрену, выполненную из труб в круговом фильтре. Введем следующие понятия:



а *б*

Рис. 27. Положение депрессионной кривой в придренной зоне, по В. В. Ведерникову:

а — дрена заполнена на всю высоту, избыточное давление в ней отсутствует; *б* — дрена заполнена частично; $h_н$ — высота нависания; $d_{кр}$ — критический диаметр.

потери напора на недостаточность диаметра $h_р$ численно равны высоте нависания над верхом дрены, если дрена представляет собой полость, заполненную водой на всю высоту без избыточного давления; они имеют место, когда диаметр дрены менее критического (по В. В. Ведерникову);

потери напора на несовершенство дрены данной конструкции по сравнению с полостью такого же размера $h_к$ пропорциональны удельному притоку и зависят от конструктивного выполнения дрены.

Условимся, что геометрические размеры дрены постоянны. За диаметр дрены d примем внешний контур фильтра. Тогда положение свободной поверхности будет зависеть от удельного притока и от наличия или отсутствия подпора в дренажной линии. В связи с этим целесообразно выделить три случая: в дрене имеется подпор, по высоте несколько превышающий верх фильтра; в дрене имеется подпор в пределах фильтра; дренажные трубы заполнены частично.

Возможные положения депрессионной кривой показаны на рисунке 28.

На этом рисунке представлены наиболее характерные случаи. Увеличение $h_к$ (из-за кольматации фильтра, заклинивания водоприемных отверстий и др.) может при-

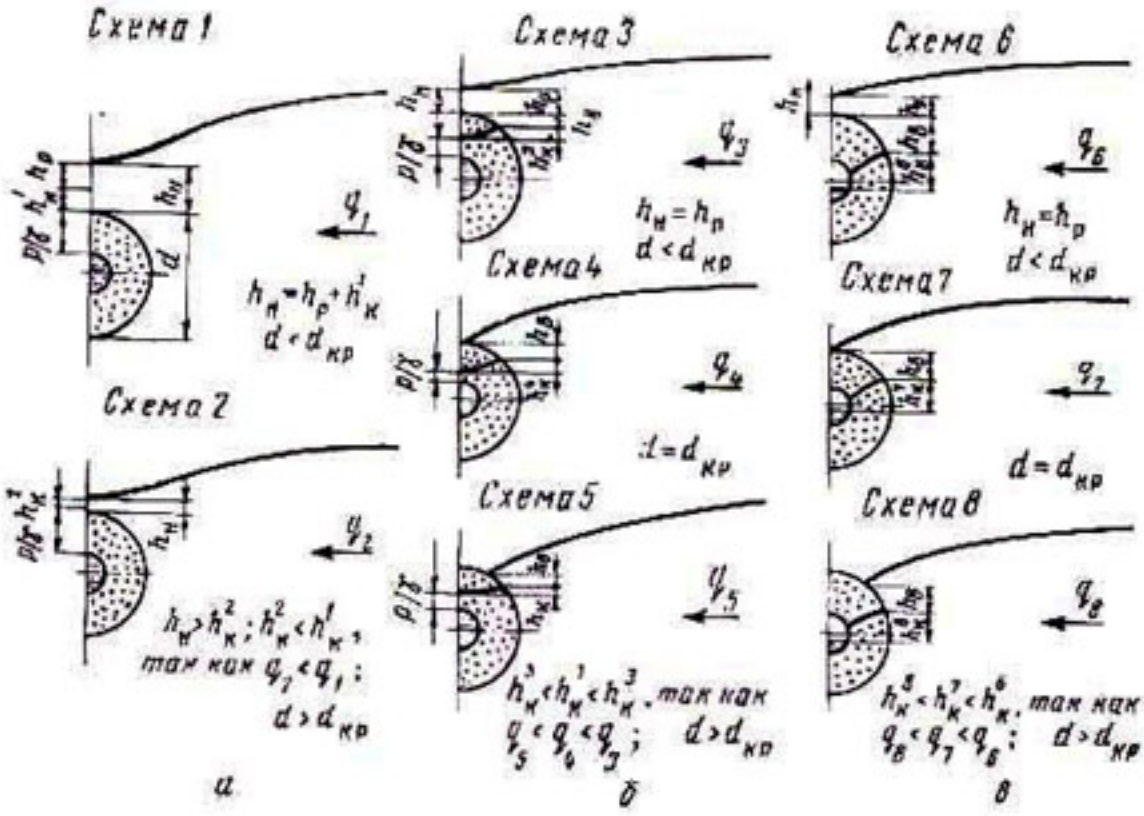


Рис. 28. Положения депрессионной поверхности при поступлении грунтовой воды в закрытую дрену:

а — подпор в дрене выше верха фильтра; *б* — подпор в дрене в пределах фильтра; *в* — дренажные трубы заполнены водой частично.

вести к тому, что схемы 3 и 6 перейдут в схему 1, а схемы 4, 5, 7 и 8 перейдут в схему 2 с той разницей, что на образование высоты нависания $h_н$ будет затрачена часть $h_к$. Промежуточные положения свободной поверхности воды в трубе ясны при рассмотрении каждой из перечисленных схем. Так, в схеме 8 увеличение $h_к$ сначала сократит участок высачивания и одновременно переместит депрессионную кривую по внешнему контуру фильтра вплоть до его верхней точки. Далее, над дреной появится нависание. До этого момента касательная к депрессионной кривой в точке соприкосновения последней с фильтром вертикальна. После образования нависания касательная к свободной поверхности воды займет над дреной горизонтальное положение.

На орошаемых землях, нуждающихся в искусственном дренировании для предотвращения развития вторичного засоления, глубина заложения закрытых горизонтальных дрен обычно составляет 3—3,5 м. Наибольшее распространение получила конструкция дрены с круговой обсыпкой из естественных песчано-гравийных и гравийно-песчаных смесей при толщине слоя фильтра 10—15 см

(иногда 20 см) и диаметре труб 10—20 см. Расчетный диаметр дрен такой конструкции в соответствии с рекомендациями В. М. Шестакова принимается равным 0,6—0,8 м.

Нельзя не упомянуть о закрытом пластмассовом дренаже, который закладывается бестраншейным способом с помощью дреноукладчика БДМ-301А. При использовании гофрированных полиэтиленовых труб диаметром 65—75 мм и песчано-гравийного фильтра расчетный диаметр пластмассовых дрен составляет 0,25—0,3 м. Если в качестве фильтра используются искусственные волокнистые материалы, то в зависимости от вида фильтра диаметр дрены может составлять 0,08—0,15 м. При дренаже из пористых труб наружный диаметр дрены составляет 15—20 см и более.

Гидравлический расчет трубчатой линии проводится из условия, что дренажные трубы заполнены на всю высоту, а избыточное давление в них отсутствует ($P=P_{атм}$). Найденный таким образом внутренний диаметр труб округляется в большую сторону до ближайшего стандартного значения. Следовательно, дренажные трубы в обычных условиях заполнены водой только частично.

Сопоставим диаметры приведенных закрытых дрен аридной зоны с критическими. Под критическим понимается диаметр, при котором депрессионные кривые смыкаются в верхней точке дрены при условии, что избыточное давление в дрене отсутствует, а $h_к=0$.

Так как точные гидромеханические решения получены для ограниченного числа расчетных схем, воспользуемся для приближенной оценки решением В. В. Ведерникова (1939):

$$d_{кр}=\frac{B}{\pi}\ln\eta, \qquad (134)$$

$$\ln\eta=\operatorname{Arcth}\sqrt{\frac{\alpha^2+\gamma_i^2}{1+\gamma_i^2}}-\frac{1}{\alpha}\operatorname{Arcth}\sqrt{\frac{\alpha^2+\gamma_i^2}{\alpha^2(1+\gamma_i^2)}}, \qquad (135)$$

где $d_{кр}$ — критический диаметр дрены, м; B — расстояние между дренами, м; $\alpha=K/\varepsilon$; K — коэффициент фильтрации грунта, м/сут; ε — интенсивность инфильтрации, м/сут; η — безразмерный параметр.

Формулы (134) и (135) отвечают распространенному в мелиоративной практике случаю работы дрены, входящей в систему, при относительно глубоком расположении водоупора и инфильтрационном питании.

Расстояние между дренами определяется по формуле

$$B = \frac{\pi H(K/\varepsilon - 1)}{\ln K/\varepsilon}, \qquad (136)$$

где H — действующий напор, м.

Так как значения $K/\varepsilon > 0{,}1$ не представляют для мелиораторов практического интереса, выражение (135) может быть аппроксимировано функцией

$$\ln \eta = 0{,}533\ \varepsilon/K + 0{,}8\,(\varepsilon/K)^2, \qquad (137)$$

что позволяет получить следующую формулу для вычисления критического диаметра:

$$d_{кр} = (0{,}17 + 0{,}255\varepsilon/K)\,\frac{B\varepsilon}{K}. \qquad (138)$$

Рассмотрение этой формулы позволяет сделать вывод, что критический диаметр дрен не превышает 0,16—0,18 м, поскольку в обычных условиях работы дренажа всегда $\varepsilon/K < 0{,}01$.

Чтобы оценить возможный диапазон изменения величин $d_{кр}$, следует обратиться к другому крайнему случаю, когда закрытый систематический дренаж залегает на водоупоре. По данным С. Ф. Аверьянова (1959),

$$d_{кр} = 0{,}3\,\frac{Q}{K}. \qquad (139)$$

Следовательно, и при близком залегании водоупора критический диаметр не превышает 0,2—0,3 м.

По-видимому, полученный порядок цифр сохранится и при фильтрации воды к дренам, работающим в более сложных условиях фильтрационного строения дренируемой толщи.

Таким образом, для дрен, в конструкцию которых входит фильтр из естественных карьерных материалов, практически всегда $d > d_{кр}$. Для дрен диаметром около 0,2 м возможно выполнение равенства $d \approx d_{кр}$. Дрены диаметром до 0,1 м в большинстве случаев будут работать с нависанием, так как для них $d < d_{кр}$.

Ранее уже упоминалось, что используемые в расчетах дренажа формулы получены без учета характера фильтрации в закрытой дрене и движения жидкости в трубах. Связано это с трудностями математического порядка.

Даже для участка от внешнего контура фильтра до внешней поверхности дренажных труб теоретическое решение получить невозможно из-за исключительно сложной картины фильтрации, сводящейся к пространственному движению потока со свободной поверхностью при наличии на границах области стоков (водоприемные отверстия) и участка высачивания. Для менее сложных случаев теоретические решения имеются, о чем будет сказано ниже. Однако совместное решение для участков вне дрены и внутри нее, когда это поддается математическому описанию, приводит к исключительно громоздким выражениям, сводящим на нет практическую ценность полученных результатов.

Поэтому целесообразно обратиться к идее метода дополнительных сопротивлений, который был использован И. А. Чарным (1963) при решении задачи фильтрации к вертикальной дрене, несовершенной по степени вскрытия водоносного пласта.

Предварительно следует остановиться на видах несовершенства, имеющих место при фильтрации грунтовой воды в закрытую дрену. Из изложенного выше видно, что закрытая дрена обладает двумя видами несовершенства, снижающими ее водоприемную способность: недостаточностью размера, если диаметр дрены d менее критического $d_{кр}$; несовершенством конструкции по сравнению с полостью такого же размера.

Первый вид несовершенства можно оценить расчетным путем по формулам, учитывающим недостаточность диаметра при вычислении междренных расстояний, или приближенно, как потери напора на недостаточность диаметра $h_р$, на которые уменьшается действующий напор. Значения $h_р$ можно получить, например, по формулам, приведенным в работах В. В. Ведерникова (1939) и С. Ф. Аверьянова и Цюй Син-е (1957). При обработке экспериментальных данных следует помнить, что высота нависания $h_н$ может быть больше $h_р$ из-за подпора воды в трубчатой линии и потерь напора, вызванных несовершенством конструкции дрены.

Количественно оценить влияние несовершенства конструкции на водоприемную способность дрены можно только по результатам обработки экспериментов.

Исходя из представлений метода дополнительных сопротивлений (Чарный, 1963), в основу обработки опытных данных может быть положена следующая формула,

учитывающая в общем виде влияние несовершенства конструкции на приток воды в дрену:

$$Q = \frac{Kh}{\Phi_0 + \frac{1}{\alpha} a_0}, \qquad (140)$$

где Q — удельный приток к дрене, м²/сут; h — общий действующий напор в пределах рассматриваемой области фильтрации, м; K — коэффициент фильтрации дренируемого грунта, м/сут; Φ_0 — фильтрационное сопротивление рассматриваемой области фильтрации (предполагается, что на месте дрены находится полость); a_0 — дополнительное сопротивление, учитывающее несовершенство конструкции дрены по сравнению с полостью такого же размера; α — угол смоченного периметра дрены (при круговом контуре питания $\alpha = 2\pi$, при полукруговом $\alpha = \pi$).

Дополнительное сопротивление a_0 является суммарным выражением сопротивлений, связанных с несовершенством дренажных труб по характеру вскрытия фильтра, наличием контактной зоны, изменением водопроницаемости фильтра в связи с фильтрационными деформациями, кольматацией и др.

Знаменатель формулы можно рассматривать как фактическое фильтрационное сопротивление Φ, которое больше теоретического Φ_0 на величину $\frac{1}{\alpha} a_0$.

Если значения Q, h и K определены экспериментально, то фактическое сопротивление находится по формуле

$$\Phi = \frac{Kh}{Q}. \qquad (141)$$

Теоретическое сопротивление Φ_0 вычисляется по одной из формул в зависимости от расчетной схемы фильтрации к закрытой дрене.

Далее рассчитывается дополнительное сопротивление на несовершенство конструкции

$$a_0 = \alpha (\Phi - \Phi_0), \qquad (142)$$

зная которое несложно определить коэффициент относительного уменьшения расчетного диаметра дрены из-за несовершенства ее конструкции:

$$\delta = \exp(-a_0). \qquad (143)$$

При вычислении междренных расстояний на этот коэффициент умножается диаметр дрены в соответствующих формулах. Таким образом, цель эксперименталь-

ных исследований — определение коэффициента δ (Серебренников, 1973).

Аналогичные предложения несколько позднее были высказаны в работах А. Д. Батурина, А. Я. Зиверта, Э. Х. Эглий и А. А. Ульянова (1974); E. G. Goungs (1974).

Формула (143) отвечает случаю, когда в непосредственной близости от дрены имеется радиальная фильтрация. Именно такая схема поступления грунтовой воды была принята А. П. Костяковым (1960) при выводе формул для глубокого залегания водоупора и инфильтрационного или внешнего питания. Только гидромеханические решения подтверждают правомерность этой схемы движения грунтовой воды в придренной зоне (Ведерников, 1939; Козлов, 1940).

Для обоснования такого подхода воспользуемся простейшей фильтрационной схемой, когда вода с поверхности земли притекает к одиночной дрене, расположенной на глубине t, а влиянием водоупора можно пренебречь. Вокруг дрены выделим фрагмент радиусом R. Фильтрационный расход за его пределами вычисляется по зависимости:

$$Q = \frac{2\pi K h_1}{\ln \frac{2t}{R}}, \qquad (144)$$

где h_1 — потери напора при движении воды от контура питания до контура выделенного фрагмента.

С учетом дополнительного сопротивления a_0 внутри фрагмента фильтрационный расход равен

$$Q = \frac{2\pi K_1 h_2}{\ln R/r + a_0}, \qquad (145)$$

где h_2 — потери напора в пределах выделенного фрагмента.

Пользуясь правилом преобразования пропорций (Чарный, 1963), складываем отдельно числители и знаменатели выражений (144) и (145). После преобразований получаем

$$Q = \frac{2\pi KH}{\ln 2t/r + a_0},$$

где $H = h_1 + h_2$.

Отсутствие в последней формуле величины R свидетельствует о допустимости указанного выше подхода при

экспериментальном определении несовершенства конструкции дрены.

Для более сложных фильтрационных схем провести доказательство с такой же наглядностью зачастую не удается. Тем не менее расчетным путем можно показать, что тот же подход применим и для более сложных схем фильтрационного строения.

Методику обработки полевых опытов, когда, по данным замеров, необходимо найти значения фактического и теоретического сопротивлений Φ_0 и Φ, предложил Н. Г. Пивовар. Он использовал предложение В. П. Насиковского относительно учета несовершенства конструкции дрены с помощью введения дополнительного члена $\Delta\Phi_{нд}$ в известную формулу:

$$Q = \frac{4\,Th}{L + 4\left(\Phi^0_{н.д} + \Delta\,\Phi_{н.д}\right)}, \qquad (146)$$

где Q — двусторонний удельный приток к дрене, м²/сут; T — суммарная проводимость водоносной толщи, м²/сут; L — половина расстояния между дренами, м; $\Phi^0_{нд}$ — фильтрационное сопротивление на гидродинамическое несовершенство дренажа, м; $\Delta\Phi_{нд}$ — дополнительное фильтрационное сопротивление, вызванное несовершенством конструкции дрены, м.

Таким образом, общее фильтрационное сопротивление рассматривается как сумма

$$\Phi_{н.д} = \Phi^0_{н.д} + \Delta\,\Phi_{н.д}. \qquad (147)$$

Описанный ранее уравнениями (140—143) общий подход к определению водоприемной способности дрены остается в силе и в случае обработки натурных замеров. Так, при однослойном строении дренируемой толщи имеют место следующие зависимости:

$$\Phi_0 = \frac{1}{4\,m_д}\left(L + \frac{4\,m_д}{\pi}\ln\frac{2\,m_д}{\pi\,d}\right), \qquad (148)$$

$$\frac{a_0}{\alpha} = \frac{\Delta\,\Phi_{н.д}}{m_д}, \qquad (149)$$

где $m_д$ — мощность расчетного слоя, м; d — расчетный диаметр дрены (по В. М. Шестакову), м.

Последняя формула остается в силе и для двухслойного строения, причем для вычисления $\Phi_{н.д}$ следует пользо-

ваться известными в литературе зависимостями В. М. Шестакова (1965), А. Я. Олейника и В. П. Насиковского (1969). Коэффициент относительного уменьшения диаметра δ вводится в расчетные формулы следующим образом:

$$d = \sqrt{0{,}25\,\delta\, d\,(b + 0{,}25\,\delta\, d)}\,. \qquad (150)$$

Итак, теоретическое сопротивление определяется по формулам в зависимости от конкретной фильтрационной схемы. Фактическое же сопротивление находится, по данным натурных замеров, например, по способу, указанному В. М. Шестаковым (1965).

Фактическое сопротивление можно определить и другим образом, если пользоваться замерами уровней грунтовых вод в скважинах, расположенных на удалении от дрены не менее одной-двух мощностей потока. Сначала находится суммарная проводимость водоносной толщи:

$$T = \frac{Q}{2}\,\frac{x_2 - x_1}{h_2 - h_1}\left(1 - \frac{x_2 + x_1}{2L}\right). \qquad (151)$$

Далее, при известных Q, h, L и T фактическое сопротивление $\Phi_{\text{п.д}}$ определяется из формулы (146).

Для вычисления суммарного сопротивления можно пользоваться также замерами уровней грунтовых вод в скважинах, расположенных вне зоны резкой деформации потока. В этом случае расчет $\Phi_{\text{п.д}}$ ведется по уравнению кривой депрессии (при известных x_i, h_i, Q, T, L):

$$h_i = \frac{Q}{2T}\left(-\frac{x_i^2}{2L} + x_i + 2\,\Phi_{\text{п.д}}\right). \qquad (152)$$

Следует особо подчеркнуть, что при определении несовершенства дренажной конструкции по опытным данным ограничиваться получением только параметра $\Delta\Phi_{\text{п.д}}$ нежелательно. Необходимо продолжать вычисления до определения коэффициента относительного уменьшения диаметра дрены δ, так как для одной и той же конструкции значение $\Delta\Phi_{\text{п.д}}$ зависит от гидрогеологических параметров, в то время как коэффициент δ остается постоянным. Это непосредственно вытекает из формулы (140), равно как и из самой идеи метода дополнительных фильтрационных сопротивлений.

Описанный способ определения водоприемной способности закрытых дрен основывается на режимных наблюдениях, проводимых по сети наблюдательных колодцев и гидрометрических постов. Однако количественную характеристику несовершенства конструкции дрены можно получить и по результатам замеров в пьезометрах и наблюдательных скважинах, расположенных непосредственно у дрены. Этот способ можно считать даже более предпочтительным, чем только что приведенный, так как гидрогеологические параметры дренируемой толщи зачастую известны лишь приближенно.

Р. Г. Джанумов один из первых предложил интерпретировать данные пьезометрических замеров в придренной зоне с помощью двух показателей: коэффициента гидравлического сопротивления, равного

$$\xi = \frac{H_к}{H_т} \tag{153}$$

и коэффициента водозабора дрены, определяемого как

$$\mu = \frac{Q_к}{Q_т}, \tag{154}$$

где $H_к$ — фактический действующий напор в пределах выделенного вокруг дрены фрагмента (радиус фрагмента $R=3$ м); $H_т$ — теоретический действующий напор в тех же условиях; $Q_к$ — фактический удельный приток; $Q_т$ — теоретический удельный приток, соответствующий расчетной схеме фильтрации в придренной зоне.

Теоретические значения $H_т$ и $Q_т$ находятся с помощью графиков, построенных по выражению

$$\left(r+\frac{2Q}{\pi^2 K}\right)\exp\left(\frac{\pi KH}{Q}\right)-\frac{2}{\pi}H-\frac{2Q}{\pi^2 K}=R, \tag{155}$$

которое является решением дифференциального уравнения:

$$\frac{Q}{2}=K\left(\frac{\pi}{2}x+y\right)\frac{dy}{dx} \tag{156}$$

при следующих граничных условиях: $x_1=r$, $y_1=0$ (на контуре дрены напор равен нулю); $x_2=R$, $y_2=H$ (на границе выделенного фрагмента напор равен H).

Недостаток предложений Р. Г. Джанумова — ограниченность их применения — только для случая однородного строения дренируемой толщи и расположения водоупо-

ра на достаточно большой глубине $\left(\frac{B}{2}T<0{,}05\right)$ без привязки замеров в околодренной зоне к другим схемам фильтрационного строения.

В этом случае формула (155) имеет вид

$$\frac{Q}{K}=\frac{\pi H}{\ln\dfrac{R+\dfrac{2H}{\pi}+2\dfrac{Q}{\pi^2 K}}{r+\dfrac{2Q}{\pi^2 K}}}. \qquad (157)$$

Ф. В. Серебренников (1976) разработал иной способ определения водоприемной способности закрытых дрен по данным пьезометрических замеров в околодренной зоне. Сущность его сводится к следующему.

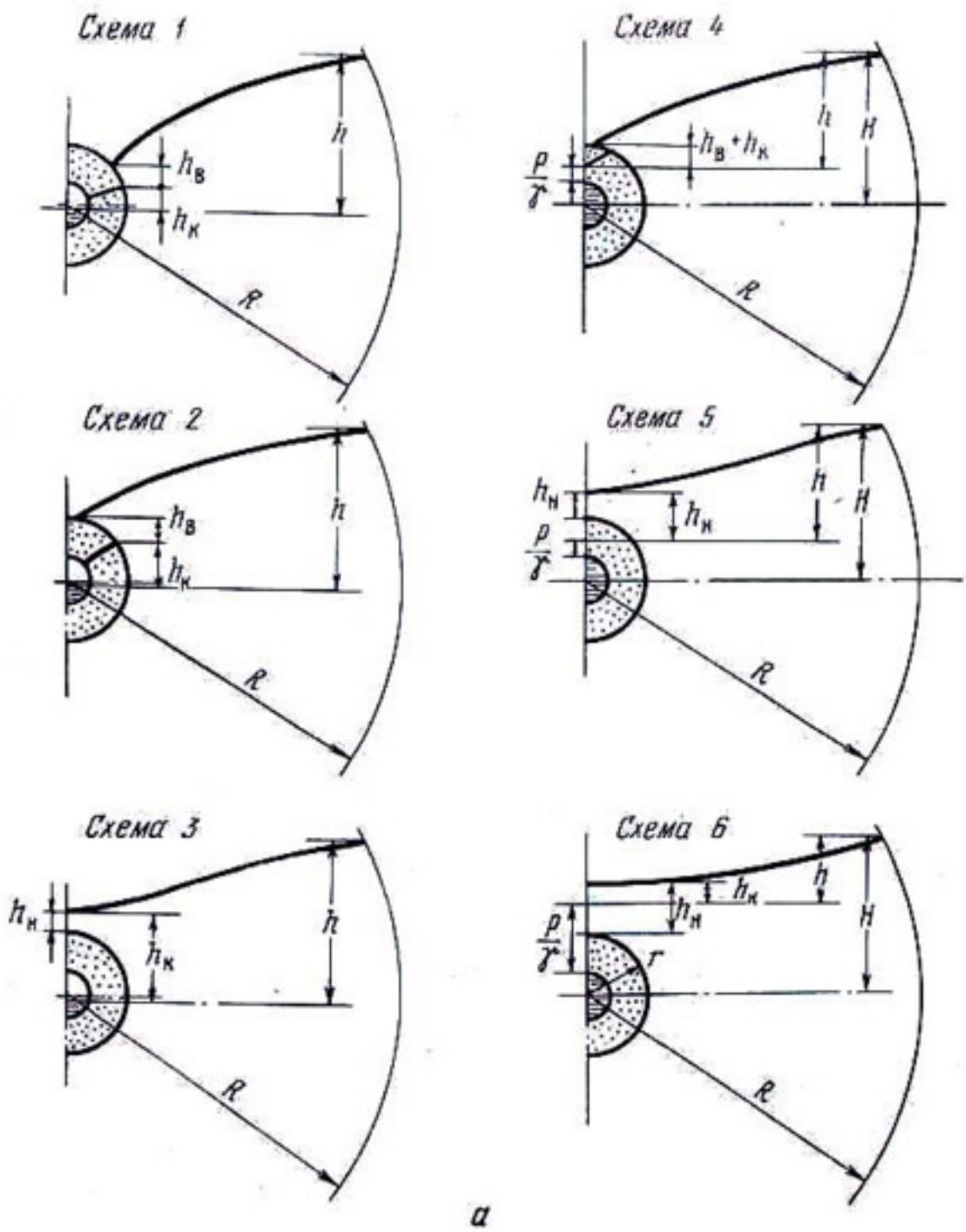
Для определения фактического и теоретического сопротивлений необходимо иметь четкое представление о картине фильтрации рядом с дреной. С этой целью были предложены различные схемы фильтрации в придренной зоне (рис. 29). Размер дрены считается постоянным. Схема 1 (рис. 29, *а*) соответствует притоку в дрену, конструкция которой создает минимальные дополнительные сопротивления, а трубчатая линия заполнена частично.

По мере снижения водоприемной способности из-за недостаточной скважности трубчатой линии или водопроницаемости фильтра произойдет уменьшение удельного притока (при неизменном действующем напоре h) и перемещение кривой депрессии вверх по контуру фильтра до образования нависания. Если в дрене имеется подпор в пределах фильтра, то будут случаи, показанные на схемах 4 и 5 (рис. 29, *а*). Типовая схема фильтрации при подпоре над верхом дрены $\left(\frac{P}{\gamma}>r\right)$ представлена схемой 6 (рис. 29, *а*), где нависание над дреной превышает уровень, вызванный подпором в трубчатой линии, на величину $h_н$, обусловленную потерями на несовершенство дрены данной конструкции по сравнению с полостью такого же размера. Если диаметр дрены меньше критического, то нависание будет наблюдаться всегда.

Для всех описанных выше случаев удельный приток в дрену определяется следующей зависимостью, полученной на основании аппроксимации решения В. В. Ведерникова:

$$Q = \frac{\pi K h}{\ln\left[\dfrac{\left(R + \dfrac{2Q}{\pi^2 K} + \dfrac{2}{\pi} y\right)\sqrt{\dfrac{2h_н}{r} + 1}}{2(r_0 + h_н) + \dfrac{2Q}{\pi^2 K}}\right]} \qquad (158)$$

где R — радиус выделенного вокруг дрены фрагмента, м; r — радиус дрены по внешнему контуру фильтра, м; h — действующий напор



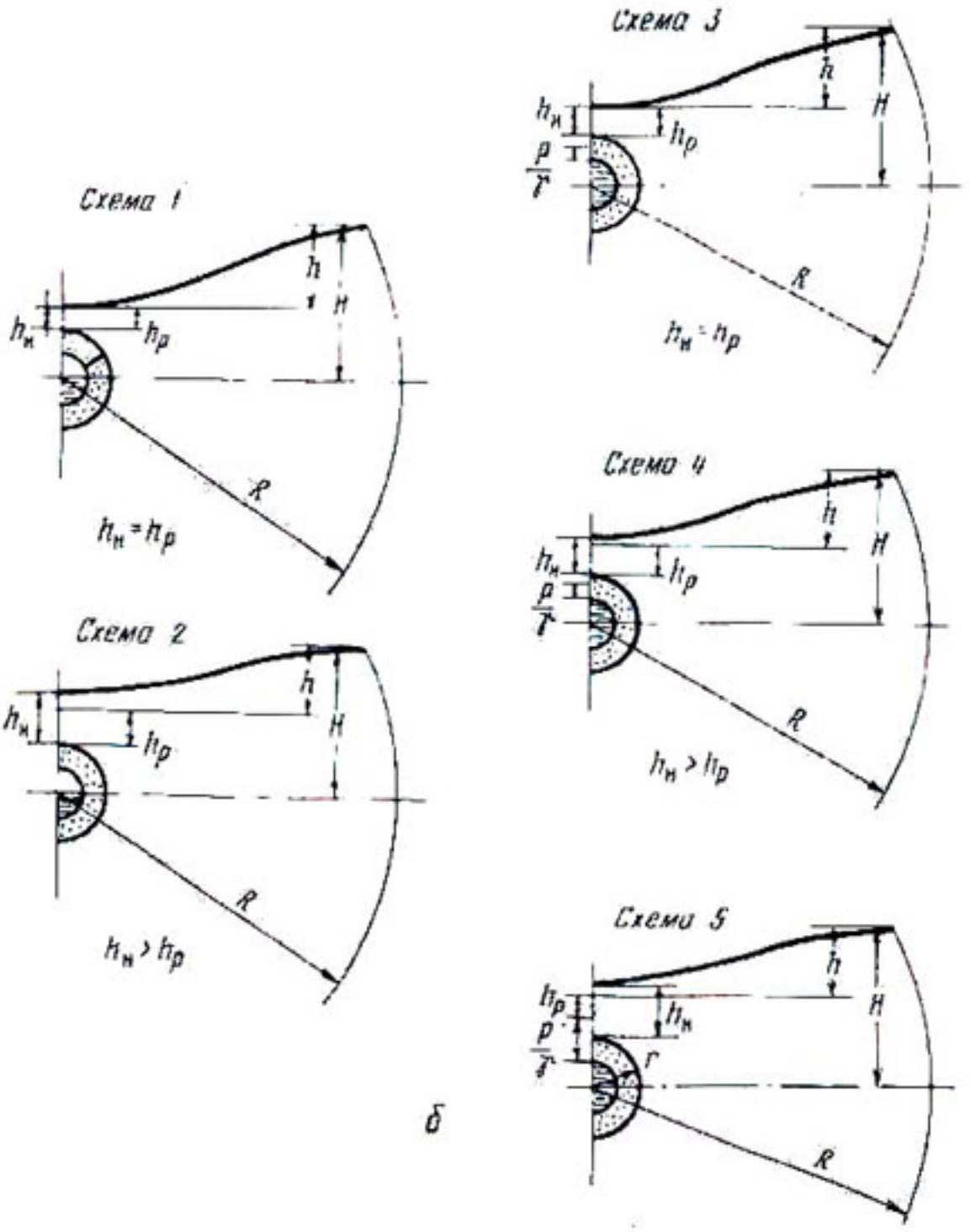
а

Рис. 29 Расчетные схемы фильтрации в придренной зоне для:
а — диаметр дрены больше критического;

в пределах выделенного фрагмента, м; y и r_0 — принимаются в соответствии с таблицей 10.

Следует учитывать, что для схем 1, 2 и 4, изображенных на рисунке 29, *а*, навпсание отсутствует, то есть $h_н = 0$. Итак, по опытным данным требуется найти сопротивления Φ_0 и Φ.

Теоретическое сопротивление определяется с помощью формулы (158). Причем сначала путем подбора находит-



б

Рис. 29 *(продолжение)*:

б — диаметр дрены меньше критического.

Таблица 10. **Значения y и r_0**

Номер расчетной схемы	Для рисунка 29, *а*		Для рисунка 29, *б*	
	y	r_0	y	r_0
1	h	0,5 r	H	r
2, 3	h	r	H	r
4, 5, 6	H	r	H	r

ся теоретическое значение Q/K, а затем из формулы (141) при известном действующем напоре h находится Φ_0. Следует особо подчеркнуть, что напор h необходимо знать с достаточно высокой точностью. Для этого замеры должны производиться по пьезометру, введенному в полость трубчатой линии.

Фактический приток в дрену может быть найден по гидродинамическим сеткам, которые строятся по результатам пьезометрических наблюдений в околодренной зоне.

Не менее перспективен и следующий способ, предложенный Ф. В. Серебренниковым (1976). Для описания распределения напоров в околодренной зоне вводится функция

$$h = a \ln (x^2 + y^2) + by + c, \qquad (159)$$

где a, b и c — коэффициенты, которые определяются по опытным данным с помощью метода наименьших квадратов. Ось oy расположена горизонтально, ось ox направлена вертикально вниз, а начало координат совпадает с осью дрены.

К достоинствам этой формулы можно отнести то, что, во-первых, она позволяет учесть неравномерность бокового притока к дрене и, во-вторых, она удовлетворяет уравнению Лапласа. Следовательно, может быть найдена функция тока по ее полному дифференциалу, так как названная функция является сопряженной гармонической по отношению к уравнению (159).

Функция тока существует и имеет вид

$$\psi_2 = -2a \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - bx + c_1. \qquad (160)$$

С помощью этой формулы находится фактический удельный приток к дрене.

С этой целью для левой ветви кривой депрессии принимается $\psi_1 = 0$. Далее по опытным данным определяется

постоянная C_1. При этом можно воспользоваться методом наименьших квадратов, так как координаты кривой депрессии бывают известны в нескольких точках. По точкам для правой ветви кривой депрессии вычисляются:

$$\psi_2 = 2a\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arc\,tg}\frac{x}{y}\right) - bx + c_1. \qquad (161)$$

Это и будет искомый фактический приток в дрену, так как

$$\frac{Q}{K} = \psi_2 - \psi_1, \qquad (162)$$

а ψ_1 ранее было принято равным нулю.

Далее, по формуле (141) при известном действующем напоре h находится Φ, а затем по формулам (142) и (143) a_0 и δ.

Для определения водоприемной способности закрытых дрен по натурным данным может оказаться полезным и метод ЭГДА, особенно при слоистом строении околодренной зоны.

Как уже отмечалось, достаточно надежные данные о водоприемной способности той или иной дренажной конструкции можно получить только экспериментальным путем, так как невозможно построить математическую модель, которая с необходимой полнотой учитывала бы всю совокупность взаимосвязанных факторов, определяющих характер поступления грунтовой воды в дрену. Однако, понимая общие закономерности формирования притока грунтовой воды в закрытую дрену, полезно рассмотреть отдельные виды сопротивлений с тем, чтобы оценить, пусть приближенно, вклад отдельных составляющих суммарного сопротивления a_0 в изменение водоприемной способности дрены.

Участок высачивания не имеет отношения к потерям напора, а является границей области фильтрации (Аравин, Нумеров, 1953).

Прежде, чем перейти к рассмотрению отдельных сопротивлений, целесообразно остановиться на следующем.

Если в конструкцию дрены входит фильтр, формулу (140) можно интерпретировать следующим образом (Ф. В. Серебренников):

$$Q = \frac{Kh}{\Phi_0 + \frac{K}{K_\Phi}\left(\Phi_\Phi + \frac{1}{\sigma} C_n\right)}, \qquad (163)$$

где $K_ф$ — коэффициент фильтрации фильтра, м/сут; $Ф_ф$ — фильтрационное сопротивление области фильтрации в пределах фильтра; C_0 — суммарное дополнительное сопротивление.

При $C_0=0$ эта формула переходит в известную формулу В. Н. Щелкачева.

По сравнению с грунтом фильтр обладает, как правило, более высокой водопроницаемостью. Поэтому при выполнении определенных условий ($K/K_ф \ll 1$) можно пренебречь вторым слагаемым в знаменателе формулы (163). Именно на этом основывается интуитивное утверждение, что можно не учитывать потери напора в фильтре (Ведерников, 1939).

Пользуясь зависимостью (149) и замечая, что

$$\frac{1}{\alpha} a_0 = \frac{K}{K_ф}\left(Ф_ф + \frac{1}{\alpha} C_0\right), \tag{164}$$

получаем

$$\Delta Ф_{н.д} = \frac{T}{K_ф}\left(Ф_ф + \frac{1}{\alpha} C_0\right), \tag{165}$$

благодаря чему становится возможной количественная оценка влияния дополнительных сопротивлений на приток воды в дрену, если известны выражения для $Ф_ф$ и C_0.

Если фильтр вокруг дрены отсутствует, то вместо формулы (165) будем иметь

$$\Delta Ф_{н.д} = \frac{1}{\alpha}\frac{T}{K_в} C_0. \tag{166}$$

В суммарное дополнительное сопротивление входят следующие составляющие:

$$C_0 = \xi_{скв} + \xi_{п.ф} + \xi_{вх} + \xi_{н.л}, \tag{167}$$

где $\xi_{скв}$ — сопротивление, обусловленное наличием у дренажных труб водоприемных отверстий (несовершенство по характеру вскрытия); $\xi_{п.ф}$ — сопротивление, вызванное изменением проницаемости фильтра (придренной зоны); $\xi_{вх}$ — сопротивление, связанное с истечением воды в полость труб через водоприемные отверстия; $\xi_{н.л}$ — сопротивление, учитывающее нарушение линейного закона фильтрации.

Каждый вид сопротивлений целесообразно рассмотреть отдельно.

Сопротивлению $\xi_{скв}$ посвящена обширная литература. Для удобства изложения обзор работ советских и зарубежных авторов целесообразно разделить на три группы в зависимости от типа водоприемных отверстий.

Зазор в месте соединения труб и его влияние на приток воды в трубчатую дрену исследовали Д. Кирхем, Ф. Энгелунд, Н. Т. Эфендиев и др.

Обобщение задачи о фильтрации жидкости к трубчатой линии, имеющей в качестве водоприемных отверстий зазоры в месте стыка дренажных труб, было сделано Ф. В. Серебренниковым. С помощью метода конформных отображений он получил следующую зависимость:

$$\xi_{скв} = \frac{S_0}{2r} \frac{K_0'}{K_0}, \tag{168}$$

где K_0 — полный эллиптический интеграл I рода при модуле m; K_0' — то же, при дополнительном модуле $m^1 = \sqrt{1-m^2}$; r — наружный радиус трубы; $S_0 = S + c$; S — длина звена трубы; c — ширина стыкового зазора.

Порядок вычислений по этой формуле следующий. Сначала по отношению

$$\frac{S_0}{2r \ln \frac{R}{r}} = \frac{K}{K'} \tag{169}$$

с помощью таблиц эллиптических интегралов находится модуль λ и интеграл K (R — граница зоны деформации потока от оси трубчатой линии). Далее определяется значение модуля m по формуле

$$m = \lambda \, sn\left(\frac{K}{S_0} c \lambda\right), \tag{170}$$

где sn — эллиптический синус Якоби.

Затем по известному m с помощью тех же таблиц эллиптических интегралов находится искомое отношение K_0'/K_0.

Как показали эксперименты, заметное влияние зазоров в месте соединения дренажных труб на характер фильтрационного потока ограничивается расстоянием, равным длине звена трубы (Серебренников, 1971). По данным Н. Т. Эфендиева, это расстояние равняется удвоенной длине дренажной трубы.

Зачастую в качестве границы зоны влияния можно рассматривать контакт дренируемого грунта с фильтром дрены, так как при достаточной водопроницаемости ($K_ф/K_{гр} > 10$) и толщине ($t_ф/S_0 > 0{,}5$) фильтровой обсыпки

возмущение фильтрационного потока практически за ее пределы не распространяется.

В ряде случаев можно избежать вычислений по формуле (168), если воспользоваться соответствующими упрощениями. Ниже рассмотрены два предельных случая.

1. Граница зоны влияния зазоров в месте соединения дренажных труб находится на достаточном удалении от оси трубчатой линии (толщина фильтра значительна по сравнению с длиной звена дренажной трубы). В соответствии с работой С. Ф. Аверьянова и Цюй Син-е (1957) принимается критерий $S_0/2r \ln\frac{R}{r} < 0{,}5$. Соответствующие упрощения эллиптических функций при модулях $\lambda \longrightarrow 0$ и $m \longrightarrow 0$ приводят к приближенной формуле

$$\xi_{скв} = -\frac{S_0}{\pi r} \ln \sin \frac{\pi c}{2 S_0}. \qquad (171)$$

2. Граница зоны влияния зазоров в месте соединения дренажных труб находится относительно близко от оси трубчатой линии (толщина фильтра невелика по сравнению с длиной звена трубы). В соответствии с упомянутой работой С. Ф. Аверьянова и Цюй Син-е принимается критерий $S_0/2r \ln\frac{R}{r} > 2$. Соответствующие упрощения эллиптических функций при модулях $\lambda \longrightarrow 1$ и $m \longrightarrow 0$ дают

$$\xi_{скв} = \frac{S_0}{\pi r} \ln\left(\frac{16\, r}{\pi c} \ln\frac{R}{r}\right). \qquad (172)$$

Н. Г. Пивовар гидравлическим путем получил следующую зависимость:

$$\xi_{скв} = \frac{C^2}{8\,(D + t_ф)\, t_ф P^2}, \qquad (173)$$

где $t_ф$ — толщина дренажного фильтра, м; P — скважность, представляющая собой отношение площади водоприемных отверстий к площади наружной поверхности трубчатой линии ($P = C/S_0$), доли единицы.

Сопротивление, возникающее при фильтрации жидкости через продольные щели, рассмотрено в работах М. Маскета, Ф. Энгелунда, В. П. Пилатовского, Л. М. Хейна, А. В. Мяскова, Д. Кирхема и др.

Благодаря использованному Ф. В. Серебренниковым приему приведения осесимметричной фильтрации к плоской можно получить путем замены $S_0 = \frac{2\pi r}{n}$ и $c = \tau$ в фор-

мулах (168) и (172) соответствующие зависимости для определения сопротивления $\xi_{скв}$ при продольной щелевой перфорации.

В общем случае вычисления ведутся по зависимости:

$$\xi_{скв} = \frac{\pi K_0'}{nK_0}. \tag{174}$$

Причем сохраняется та же последовательность определения модуля λ и интеграла K с помощью отношения:

$$\frac{\pi}{n \ln \frac{R}{r}} = \frac{K}{K'} \tag{175}$$

и модуля m по формуле

$$m = \lambda \operatorname{sn}\left(\frac{Kn\tau}{2\pi r}, \lambda\right), \tag{176}$$

где n — число рядов продольных щелей.

Отношение K_0'/K находится по таблицам эллиптических интегралов.

Как и ранее, возможны упрощения:

1) $\dfrac{\pi}{n \ln \frac{R}{r}} < 0{,}5$ (толщина фильтра относительно велика по сравнению с расстоянием между смежными щелями). В данном случае

$$\xi_{скв} = -\frac{2}{n} \ln \sin \frac{n\tau}{4r}. \tag{177}$$

Этой формуле нетрудно придать вид, полученный В. П. Пилатовским:

2) $\dfrac{\pi}{n \ln \frac{R}{r}} > 2$ (толщина фильтра относительно мала по сравнению с расстоянием между смежными щелями). Тогда

$$\xi_{скв} = \frac{2}{n} \ln\left(\frac{16r}{\pi\tau} \ln \frac{R}{r}\right). \tag{178}$$

Подобный же результат был получен А. С. Березнером (1971) без указания границ применимости для частного случая.

Представляет интерес предложение А. И. Мурашко и В. Т. Климкова (1969) об учете прерывистости продольной щелевой перфорации с помощью отношения l/L, подставляемого в соответствующие расчетные формулы:

$$\xi_{скв} = -\frac{2L}{nl} \ln \sin \frac{nl}{2L} \theta, \qquad (179)$$

где l — длина щелей; L — шаг между щелями; $\Theta = \arcsin \tau/D$.

В 1975 г. Г. Н. Пивовар предложил следующую формулу для случая притока в трубчатую дрену с продольной щелевой перфорацией:

$$\xi_{скв} = \frac{n^2 \tau^4}{4\pi^2 t_ф (D + 2t_ф) D^2 p^2}. \qquad (180)$$

Теоретическое решение задачи о притоке жидкости в дрену или скважину при наличии круглых отверстий наталкивается на практически непреодолимые математические трудности. В строгой математической постановке подобная задача относится к категории самых трудных трехразмерных задач теории поля при смешанных граничных условиях (Щуров, 1953).

Последнее решение указанной задачи предложил Н. Г. Пивовар, который гидравлическим путем получил следующую формулу:

$$\xi_{скв} = \frac{n^2 d_{скв}^4}{64 (D + 2t_ф) D^2 p^2}. \qquad (181)$$

Выше были рассмотрены работы, в которых сопротивление $\xi_{скв}$ определялось теоретически или экспериментально — на электрических моделях при условии, что фильтрация имеет место в однородной изотропной пористой среде. По данным В. И. Щурова (1953), В. М. Гаврилко (1968), D. Kirkham, I. Schwab (1951) и других, выявлено значительное расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований с данными практики.

Опыт применения закрытого горизонтального дренажа в СССР и за рубежом показывает, что скважность порядка 0,3—0,7% внешней поверхности трубы вполне достаточна для своевременного приема грунтовой воды (А. Н. Костяков, Б. С. Маслов, Е. А. Нестеров, С. Е. Houston и др.). Например, дополнительная перфорация стенок гончарных труб длиной 0,3 м оказалась излишней (В. С. Малыгин, R. Grande, A. Losada).

При скважности 0,3—0,7% приток на один метр дрены Q составляет всего 40—50% притока к дрене Q_0, совершенной по характеру вскрытия. Это означает, что около половины действующего напора теряется при входе грунтовой воды в водоприемные отверстия. Даже при скважности 2—3% величина Q составляет всего лишь 60—75% Q_0.

Объяснение отмеченному противоречию будет дано ниже.

Сопротивление $\xi_{п.ф}$ и его влияние на водоприемную способность дренажа изучено далеко не достаточно. В связи с этим рассмотрим ряд случаев, представляющих практический интерес.

В современных дренажных системах все шире применяют трубофильтры из пористого бетона. Чтобы определить их водоприемную способность, необходимо оценить потери напора на контакте пористого бетона с дренируемым грунтом, а также в пористом теле трубофильтра. Эта работа была проделана в институте ВОДГЕО (Абрамов, Дегтярев, Корниенко, 1976). В результате была предложена следующая расчетная формула:

$$\Delta h_0 = \left(\frac{aR_1 \ln \frac{R_1}{R_2}}{F} + \frac{\alpha_к}{F} \right) Q + \left[\frac{b\left(\frac{R_1}{R_2} - 1\right)}{F^2} + \frac{\beta_к}{F^2} \right] Q^2, \tag{182}$$

где Q — приток на единицу длины дрены; F — площадь поверхности трубофильтра, к которой притекает расход Q; $\alpha_к$ и $\beta_к$ — экспериментально найденные коэффициенты контактных сопротивлений, определяемые с помощью специальных графиков; a и b — коэффициенты в формуле Прони, определяемые по таблице, составленной по результатам экспериментов.

Эта формула позволяет найти общие потери напора при поступлении грунтовой воды в пористую дрену, оценить отдельные их составляющие: потери на фильтрацию в пористом теле и потери в контактной зоне. Последнее особенно ценно, так как других предложений по этому вопросу в настоящее время не имеется.

При ламинарной фильтрации второй член в правой части формулы (182) пропадает. Благодаря этому становится возможным получить зависимости для следующих условий:

вокруг пористых труб имеется фильтр

$$\Delta\Phi_{\text{нд}} = \frac{T}{K_{\text{ф}}}\left(\Phi_{\text{ф}} + \frac{K_{\text{ф}}}{K_{\text{тр}}}\Phi_{\text{тр}} + \frac{1}{\alpha}\,\frac{K_{\text{ф}}\,\alpha_{\text{к}}}{86\,400\,R_{\text{н}}}\right); \quad (183)$$

пористые трубы уложены непосредственно в грунт

$$\Delta\Phi_{\text{нд}} = \frac{T}{K_{\text{тр}}}\left(\Phi_{\text{тр}} + \frac{1}{\alpha}\,\frac{K_{\text{тр}}\,\alpha_{\text{к}}}{86\,400\,R_{\text{н}}}\right), \quad (184)$$

где $K_{\text{тр}}$ — коэффициент фильтрации тела пористой трубы, м/сут; $R_{\text{н}}$ — наружный радиус пористой трубы, м; $\Phi_{\text{тр}}$ — фильтрационное сопротивление пористой трубы (если труба принимает воду половиной поверхности, то $\Phi_{\text{тр}} = \frac{1}{\pi}\ln\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{в}}}$); $K_{\text{ф}}$ — коэффициент фильтрации фильтра, м/сут; T — проводимость м²/сут; $\alpha_{\text{к}}$ — то же, что в формуле (182).

Нетрудно заметить, что в приведенных зависимостях последние члены, стоящие в скобках в правой части, и являются сопротивлениями $\xi_{\text{п.ф}}$ $\left(\text{без множителя } \frac{1}{\alpha}\right)$.

Для изучения водоприемной способности дренажа большое значение имеют исследования фильтрационных деформаций на контакте дренируемого грунта и фильтра. Это относится как к традиционным фильтрам из песчано-гравийной или гравийно-песчаной смеси, так и к фильтрам из искусственных волокнистых материалов. Причем сюда же можно отнести дренаж из пористых труб, укладываемых в связных грунтах. Достаточно обоснованная методика оценки фильтрационных деформаций для случая плоской фильтрации разработана в УкрНИИГиМ (Кононов, Насиковский, 1974). Указанная методика может быть распространена и на случай радиальной фильтрации.

По аналогии с вертикальными скважинами к рассматриваемому виду сопротивлений можно отнести уплотнение придренной зоны, возникающие в той или иной степени при работе механизмов, например при укладке пластмассового дренажа бестраншейным методом. Теорию влияния уплотнения грунта в придренной зоне на приток грунтовой воды в дренаж изучал М. Г. Хубларян.

Необходимо также остановиться на влиянии фильтрационных деформаций у водоприемных отверстий на приток воды в дренаж. Выше уже говорилось о противоре-

чии между теоретическими и фактическими данными о притоке воды в дренаж в зависимости от скважности трубчатой линии.

В этой связи следует отметить, что реальные грунты не являются абсолютно прочными, способными, не разрушаясь, испытывать воздействие гидродинамических сил. Напротив, большинство грунтов при определенных значениях градиента напора подвержено фильтрационным деформациям. Разрушающий, или критический, градиент для данного вида грунта зависит от ряда факторов: механического состава, средней плотности, текстуры, числа пластичности, характера нагрузки, направления скорости фильтрации и др.

Для объяснения отмеченного противоречия прежде всего следует установить, насколько верно отражены действительные условия работы закрытой горизонтальной дрены в экспериментах или при выводе теоретических формул. Представляется, что наиболее существенное допущение заключено в условии недеформируемости среды, в которой происходит фильтрация.

В связи с этим важно хотя бы приближенно оценить влияние фильтрационных деформаций, развивающихся у водоприемных отверстий, на приток воды в дрену. Такую оценку дал Ф. В. Серебренников (1971). При анализе в качестве исходных были приняты следующие положения: на расстоянии $\rho_{кр}$ от центра отверстия градиент достигает критической величины $I_{кр}$, начиная с которой происходит переформирование частиц в зоне от ρ_0 до $\rho_{кр}$, где ρ_0 — радиус свода над отверстием; водопроницаемость пористой среды в зоне от ρ_0 до $\rho_{кр}$ изменяется таким образом, что I остается постоянным и равным $I_{кр}$; общий действующий напор $H = \text{const}$; эквипотенциальные поверхности вблизи зазора имеют форму внешней поверхности тора, вблизи круглых отверстий — полусферы.

Были рассмотрены частные случаи: у водоприемного отверстия в некотором локальном объеме произошел полный вынос грунта (характерно для дрен, укладываемых без фильтра); в локальном объеме грунта, прилегающем к водоприемному отверстию, произошло переформирование частиц (характерно для дрен с фильтром из естественных материалов).

Для количественного определения влияния деформаций у круглых водоприемных отверстий были получены

следующие формулы:

$$\xi_{п.ф} = \frac{1}{N} \frac{2\rho_{кр} - \rho_0}{\rho_{кр}^2}, \tag{185}$$

где N — число круглых отверстий на 1 м трубчатой линии.

Если трубы уложены в грунт и, следовательно, у отверстий образуются полости, значения $\rho_{кр}$ находятся по формуле

$$\rho_{кр} = \frac{\sqrt{1 + 8\pi N\Phi_0 \frac{H}{I_{кр}}} - 1}{4\pi N\Phi_0}. \tag{186}$$

Если вокруг трубчатой линии уложен фильтр и, следовательно, имеют место фильтрационные деформации у отверстий, то

$$\rho_{кр} = \frac{\sqrt{1 + 2\pi N\left(\frac{K_ф}{K}\Phi_0 + \Phi_ф\right)\left(\rho_0 + \frac{H}{I_{кр}}\right)} - 1}{2\pi N\left(\frac{K_ф}{K}\Phi_0 + \Phi_ф\right)}. \tag{187}$$

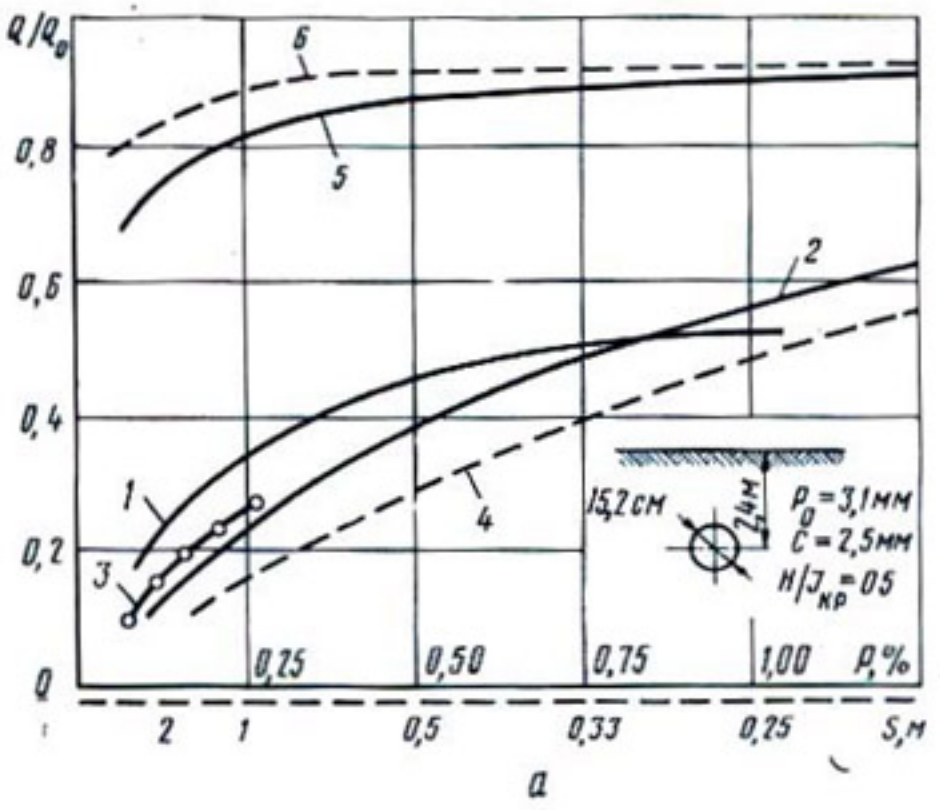
Для сопоставления с результатами D. Kirkham, I. Schwab (1951) в качестве расчетной схемы фильтрации Ф. В. Серебренников принял приток к одиночной подрусловой горизонтальной дрене, заложенной на глубину 2,4 м от поверхности земли (рис. 30).

Характер кривых на этих рисунках свидетельствует о решающем значении фильтрационных деформаций в увеличении водоприемной способности дрены.

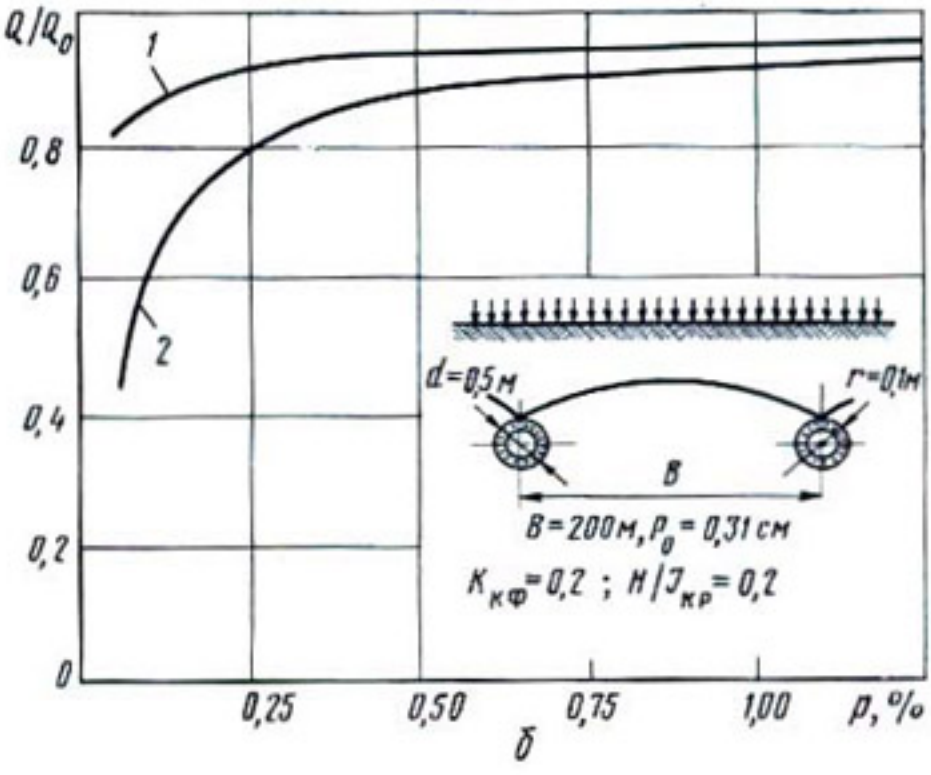
Поэтому реальные грунты не следует рассматривать как однородные изотропные, так как тем самым недопустимо завышаются потери напора на преодоление сопротивления, вызванного наличием водоприемных отверстий. Удовлетворительная сходимость с данными практики имеет место лишь при учете развития локальных фильтрационных деформаций у водоприемных отверстий.

Вот почему при скважности порядка 0,3—0,7%, принятой в отечественной и зарубежной практике, приток в дрену не отличается существенно от максимально возможного в данных условиях, то есть всегда $Q \simeq Q_0$.

Сопротивление $\xi_{вх}$ определяется потерями кинетической энергии при истечении воды в полость трубы через водоприемные отверстия.



а



б

Рис. 30. Графики относительного расхода:
а — для одиночной подрусловой дрены: *1* — по Д. Кирхему и И. Швебу; *2* — по И. А. Чарному; *3* — по В. И. Щурову; *4* — по Ф. Энгелунду; *5*, *6* — с учетом фильтрационных деформаций; *б* — для дрены, входящей в систему: *1* — с учетом фильтрационных деформаций; *2* — без учета фильтрационных деформаций.

Для дренажа, применяемого в сельском хозяйстве, сопротивление $\xi_{вх}$ практически равно нулю за счет ничтожно малых входных скоростей.

Большие экспериментальные исследования по изучению гидравлики поступления воды в водоприемные отверстия трубчатого дренажа были проведены в институте ВОДГЕО (Донской, 1969). При постановке опытов автор исходил из известной формулы, описывающей истечение через отверстие в тонкой стенке:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}, \qquad (188)$$

где Q — расход, поступающий через водоприемное отверстие; ω — площадь поперечного сечения отверстия; H — действующий напор.

Коэффициент μ рассматривался как обобщенный коэффициент расхода отверстия. Цель экспериментов сводилась к определению зависимости коэффициента μ от целого ряда факторов, характерных для истечения воды через водоприемные отверстия при наличии фильтровой обсыпки различного механического состава. Были изучены два вида отверстий: круглые и продольные прерывистые щели. Накопленный экспериментальный материал позволил установить, что при $p<2$—3% на коэффициент расхода практически не влияет ни число Рейнольдса, ни скважность. Одновременно опытным путем была найдена зависимость коэффициента μ от отношения d_{25}/t и построены соответствующие графики (t — размер отверстия). Результаты, полученные на фильтрационных установках, были проверены затем в грунтовых лотках в условиях, типичных для работы горизонтального дренажа,— неполное заполнение труб, различный характер подтопления водоприемных отверстий, несимметричный приток и др. Опыты в фильтрационных лотках подтвердили возможность практического использования полученных рекомендаций для расчета водоприемной поверхности трубчатого дренажа.

Единственный недостаток описанной методики — неопределенность в выборе расчетного значения напора H. С. К. Абрамов предлагает в качестве этой величины принимать некоторые минимально допустимые потери напора.

Нужные зависимости можно получить, если воспользоваться изложенным выше методом дополнительных фильтрационных сопротивлений. Не останавливаясь на

промежуточных выкладках, приведем следующую формулу для определения сопротивления $\xi_{вх}$ для круглых отверстий:

$$\xi_{вх} = \frac{\alpha KQ}{2g\,(\pi Dp\,\mu\,86\,400)^2}, \qquad (189)$$

где Q — расчетный приток на 1 м дрены, м²/сут; K — коэффициент фильтрации грунта, прилегающего к отверстиям, м/сут; μ — коэффициент расхода, по С. К. Абрамову; p — скважность, доли единицы; D — наружный диаметр дренажной трубы, м; α — тот же, что в формуле (140); g — ускорение свободного падения, м/с².

Аналогично можно получить выражение для расчета $\xi_{вх}$, когда водоприемными отверстиями служат щели. Так, Н. Г. Пивовар дает зависимость, близкую по смыслу формуле (189).

Следует отметить, что в ряде работ Ф. М. Бочевера, В. С. Алексеева, В. М. Гаврилко, А. Г. Тесля сопротивления $\xi_{скв}$ и $\xi_{вх}$ рассматриваются суммарно. Такой подход представляется ошибочным, так как потери напора, вызванные сопротивлением $\xi_{вх}$, линейно зависят от расхода, в то время как для потерь, вызванных сопротивлением $\xi_{скв}$, справедлива квадратичная зависимость.

Сопротивление $\xi_{нл}$ имеет место при нарушении закона Дарси. Как известно, линейный закон фильтрации основывается на положении о том, что силами инерции по сравнению с силами трения (вязкости) можно пренебречь. Однако при больших скоростях силы инерции в жидкости могут стать соизмеримыми с силами трения. В первом случае, когда можно пренебречь силами инерции, движение жидкости в порах является ламинарным, во втором движение переходит в турбулентное. В качестве критерия применимости закона Дарси выбрано число Рейнольдса, характеризующее отношения сил инерции к силам трения в потоке жидкости. Число Рейнольдса, при котором наблюдается отклонение от закона Дарси, называется критическим.

В. И. Аравин и С. Н. Нумеров (1953) указывают, что практически закон Дарси применим, когда выполняется условие:

$$\frac{vd}{\nu} \leqslant 4 \div 6,$$

где v — скорость фильтрации, см/с; d — эффективный диаметр частиц грунта, см; ν — кинематический коэффициент вязкости, см²/с.

При поступлении грунтовых вод в полость дренажных труб через водоприемные отверстия практически всегда сохраняется ламинарное движение. Поэтому целесообразно сопротивление $\xi_{\text{ил}}$ принять равным нулю.

Таким образом, анализ указанных выше сопротивлений показал, что при рассмотрении водоприемной способности закрытого трубчатого дренажа, сопротивлениями $\xi_{\text{вх}}$ и $\xi_{\text{ил}}$ можно пренебречь.

Сопротивление $\xi_{\text{вх}}$ следует учитывать только при проведении опытов в фильтрационных лотках, когда могут возникнуть большие входные скорости при относительной малой площади водоприемных отверстий.

Таким образом, рациональной (с позиций водоприемной способности) следует считать конструкцию, которая практически сводит на нет дополнительные сопротивления, связанные с несовершенством дрены по сравнению с полостью такого же размера.

Из приведенных теоретических зависимостей вытекает, что по сравнению с прочими факторами наибольшее влияние на параметр a_0 оказывает отношение $K_{\text{ф}}/K$ и сопротивление $\xi_{\text{скв}}$. На основе анализа соответствующих зависимостей (при $\xi_{\text{скв}}=0$) фильтры рекомендуется подбирать из условия $K_{\text{ф}}/K>10$. К аналогичному выводу путем моделирования методом ЭГДА пришел и В. Р. Булдей.

При $K_{\text{ф}}/K=\text{const}$ параметр a_0 главным образом зависит от изменения скважности трубчатой линии. С ростом скважности значения a_0 уменьшаются и, следовательно, уменьшаются дополнительные потери напора. На этом основании за рациональную принимается скважность (Ф. В. Серебренников), начиная с которой потери Δh будут ничтожно малы, благодаря чему приток в дрену сравняется с максимально возможным в данных условиях или при которой потери Δh будут равны некоторой допустимой величине, определяемой условием $Q\simeq Q_{\max}$. Если Δh не превышает высоты слоя фильтра над трубами, сокращение действующего напора компенсируется увеличением водоприемной поверхности фильтра и рассредоточением за счет этого потока грунтовой воды у дрены. Первое условие позволяет найти максимальное число отверстий, превышать которое нецелесообразно, второе — минимальное число отверстий. Дальнейшее сокращение числа отверстий приведет к ощутимому уменьшению притока в дрену.

Изложенные в этом разделе теоретические предпосылки изучения водоприемной способности конструкции закрытого дренажа могут быть использованы при технико-экономическом обосновании элементов дренажных конструкций.

Гидравлический расчет горизонтального дренажа

Гидравлический расчет трубчатого дренажа в проектных проработках сводится к определению расчетного диаметра труб, их наполнения и скорости течения воды. Расчет ведется по формулам равномерного движения в предположении, что дренажные трубы заполнены на всю высоту, а избыточное давление в них отсутствует ($P = P_{атм}$). Диаметр дренажных труб подбирается из условия пропуска максимального расхода. Затем выбранный диаметр проверяется на пропуск нормального расхода. В зависимости от длины дрены, подвешенной площади и значения дренажного модуля расчет производится по участкам, отличающимся диаметром труб.

В формулах равномерного движения коэффициент Шези принимается по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \qquad (190)$$

Рекомендуются следующие значения коэффициента шероховатости*:

гончарные трубы длиной до 1 м	0,017
бетонные и железобетонные трубы	0,015
асбестоцементные трубы	0,013
полиэтиленовые трубы	0,012

Допустимая скорость течения воды в трубах ограничивается пределами 0,15—1,2 м/с.

Минимальные уклоны основных элементов коллекторно-дренажной сети приведены ниже.

Закрытые дрены диаметром, мм:	
50—100	0,0020
125—200	0,0015
Более 200	0,0010
Закрытые коллекторы	0,0005
Открытые коллекторы	0,0003

* Инструкция по проектированию оросительных систем. Часть VIII. Дренаж на орошаемых землях (ВСН П-8-74).

Для облегчения гидравлического расчета трубчатого дренажа предлагается пользоваться номограммой, изображенной на рисунке 31. Такой тип номограммы широко применяется при гидравлическом расчете канализации, элементов закрытой оросительной сети и др. Полученные значения диаметра трубы и скорости течения воды пересчитываются затем для конкретного коэффициента шероховатости с помощью поправочных коэффициентов.

n	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020
K_D	1,04	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,22	1,25	1,28	1,30
K_v	0,93	0,87	0,82	0,78	0,75	0,70	0,67	0,64	0,62	0,59

В последние годы в мелиоративном строительстве все большее распространение получают пластмассовые трубы — гладкостенные и гофрированные. В связи с этим особый интерес приобретают гидравлические исследования пластмассовых труб. Значительный опыт в указанном направлении накоплен в БелНИИМиВХ.

А. И. Мурашко (1973) рекомендует следующие формулы для гидравлического расчета пластмассовых труб:

гладкостенные трубы:

$$\left.\begin{aligned} Q &= 61{,}62\ \chi_1 D^{2{,}745} i^{0{,}573}, \\ v &= 220{,}5\ \chi_1 R^{0{,}745} i^{0{,}573}, \end{aligned}\right\} \qquad (191)$$

гофрированные трубы конструкции БелНИИМиВХ:

$$\left.\begin{aligned} Q &= 22{,}79\ D^{2{,}645}\ i^{0{,}503}, \\ v &= 70{,}92\ R^{0{,}645}\ i^{0{,}503}, \end{aligned}\right\} \qquad (192)$$

конструкции Научно-исследовательского института полимерных материалов (НИИПМ):

$$\left.\begin{aligned} Q &= 24{,}54\ D^{2{,}667}\ i^{0{,}52}, \\ v &= 78{,}96\ R^{0{,}667}\ i^{0{,}52}, \end{aligned}\right\} \qquad (193)$$

где D — внутренний диаметр, м; χ_1 — коэффициент, учитывающий наличие перфорации, $\chi_1 = 0{,}93—0{,}98$; для неперфорированных труб $\chi_1 = 1$.

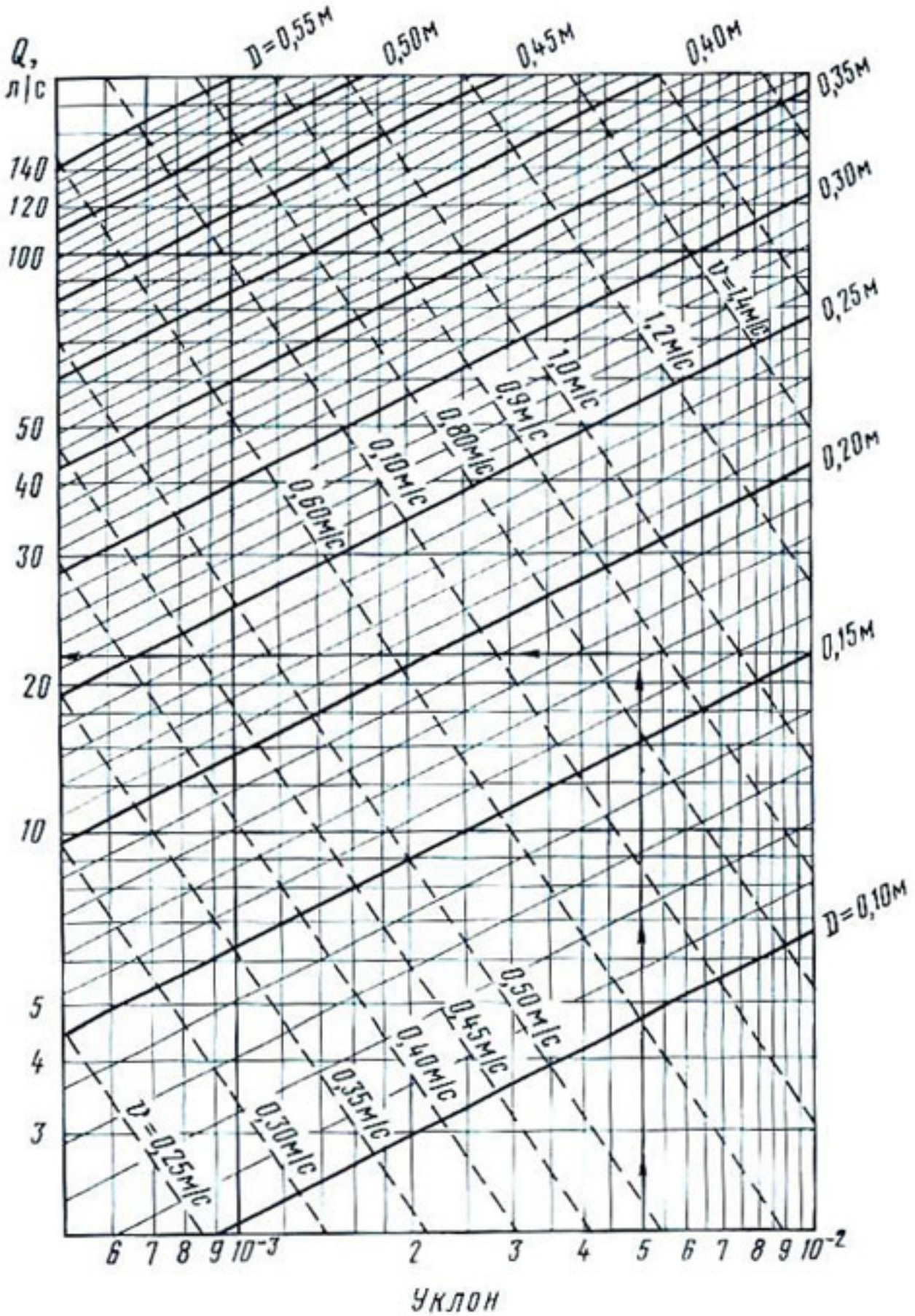


Рис. 31. Номограмма для гидравлического расчета закрытой коллекторно-дренажной сети.

А. И. Мурашенко подчеркивает, что крутая и продольно-щелевая перфорации хорошего качества уменьшают пропускную способность труб на 2,7—6,5%. Он сделал вывод, что дополнительными потерями напора, возникающими при движении жидкости в трубопроводах с присоединением расхода вдоль пути, можно пренебречь, если иметь в виду специфические условия работы осушительного дренажа.

Заслуживают внимания результаты многолетних исследований Б. Блажиса. Например, формула для гидравлического расчета керамических дренажных труб

$$v = -3{,}63 \lg \left[\frac{(2{,}75 \cdot 10^{-5})^2}{D} + \frac{(9{,}53 \cdot 10^{-6})^{1{,}8}}{vD} \right] D^{0{,}5} i^{0{,}5}. \quad (194)$$

Б. Блажис отметил отклонение опытных данных от результатов вычислений по формулам равномерного движения для случая работы дренажных труб с различным наполнением. Объяснил это явление А. Д. Альтшуль. Он подчеркнул, что сопротивление течению воды в канале неидентично сопротивлению в круглой напорной трубе, обладающей тем же гидравлическим радиусом и той же шероховатостью.

Несомненный интерес представляют предложения Б. Блажиса по учету гидравлического сопротивления частично заиленных труб, а также опытные данные о влиянии отклонений дренажной линии от проектного уклона на пропускную способность дрены. Экспериментальные исследования позволили установить максимально возможное отклонение от заданного уклона ± 1 см для дрен диаметром 50 мм ($i = 0{,}005$—$0{,}010$) и ± 2 см для дрен диаметром 100 мм ($i = 0{,}002$—$0{,}007$).

Исследования пропускной способности гибких витых трубопроводов диаметром 100 мм из полихлорвинила были выполнены в Киевском инженерно-строительном институте (Э. В. Залуцкий). Опыты позволили найти коэффициент шероховатости таких труб ($n = 0{,}012$) при работе их полным сечением и отсутствии защемленного воздуха.

Способы гидравлического расчета трубчатого дренажа, принятые за рубежом, принципиально ничем не отличаются от только что изложенных.

Формулами равномерного движения для гидравлического расчета трубчатого дренажа пользуются не одно десятилетие, хотя фактическая картина намного слож-

ней — движение носит неустановившийся характер. Особенность течения воды в трубчатой дрене — изменение расхода вдоль пути.

Гидравлическая теория потоков с переменным вдоль пути расходом может быть основана на представлениях механики о движении тела переменной массы, причем полученные результаты сохраняют силу только для одномерных потоков. В общем же случае для описания таких потоков следует пользоваться дифференциальными уравнениями гидродинамики при соответствующих граничных условиях.

Развитие гидравлики жидкости с переменным вдоль пути расходом обусловлено запросами практики. Кроме закрытых или открытых дрен, путевой расход изменяется в водопроводной и канализационной сетях, в каналах, имеющих боковые водосливы, в дырчатых или пористых трубопроводах, применяющихся при внутрипочвенном орошении и во многих других случаях. Ориентировочные расчеты показывают, что присоединение расхода вдоль пути снижает разницу отметок или, что то же самое, уклона в 3 раза.

В разработку гидравлической теории движения жидкости с переменным вдоль пути расходом выдающийся вклад внесли Н. Г. Малишевский, В. М. Маккавеев, Я. Т. Ненько, И. М. Коновалов, А. Н. Патрашев и др.

Приняв в качестве предпосылки, что присоединение или отделение расхода происходит равномерно по живому сечению потока, И. М. Коновалов получил следующее уравнение:

$$\frac{1}{g}\left[\int\frac{\partial v}{\partial t}\,dS+\int\frac{1-m}{\omega}\,\frac{\partial Q}{\partial t}\,dS+\int\frac{1-m}{\omega}\,v\,dQ\right]+$$

$$+\frac{v^2}{2g}+\frac{p}{\gamma}+y+h_w=C, \qquad (195)$$

где v — средняя скорость потока; Q — расход, присоединившийся от начала движения до момента времени t; ω — площадь живого сечения потока; m — отношение проекции скорости присоединяемого (отделяемого) расхода на направление движения к средней скорости основного потока; p/γ — пьезометрическая высота; $v^2/2g$ — скоростной напор; g — ускорение свободного падения; y — ордината оси потока по отношению к плоскости сравнения; h_w — потери на трение; C — постоянная интегрирования.

Формула (195) в наиболее общем виде описывает в гидравлической постановке движение жидкости с пере-

менным вдоль пути расходом и содержит в себе различные частные случаи.

При постоянном расходе эта формула переходит в уравнение движения жидкости в условиях неустановившегося режима:

$$\frac{1}{g}\int \frac{\partial v}{\partial t}\, dS + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + y + h_w = C. \qquad (196)$$

Если движение с переменным вдоль пути расходом носит установившийся характер $\left(\frac{dv}{dt} = 0, \frac{dQ}{dt} = 0\right)$, то уравнение (195) принимает вид

$$\frac{1}{g}\int \frac{1-m}{\omega}\, v dQ + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + y + h_w = C. \qquad (197)$$

На основе последнего уравнения И. М. Коновалов получил следующую формулу для определения напора в случае движения воды в трубопроводе постоянного сечения с равномерным присоединением расхода вдоль пути:

$$h = \frac{(Q_т + qx)^3 - Q_т^3}{3\, qK} + \frac{(Q_т + qx)^2 - Q_т^2}{2\, g\, \omega^2}. \qquad (198)$$

Первый член правой части этой формулы характеризует потери напора на трение, а второй член — потери напора на смешение.

Если транзитный или начальный расход отсутствует ($Q_т = 0$) и длина трубопровода равна $x = S$, то формула (198) принимает такой вид

$$h = \frac{q^2 S^3}{3\, K^2} + \frac{q^2 S^2}{3\, g\omega^2}. \qquad (199)$$

Закрытый трубчатый дренаж в условиях правильной его эксплуатации относительно редко работает полным сечением. Объясняется это как запасами, которыми сопровождается подбор диаметра дренажных труб по формулам установившегося движения, так и невозможностью непрерывного изменения диаметра дрены по ее длине.

К сожалению, мало работ, в которых затрагиваются вопросы гидравлического расчета трубчатого дренажа с присоединением расхода вдоль пути.

Так, рассмотрев уравнение, аналогичное формуле (198), Н. Т. Эфендиев пришел к заключению, что проверочный расчет диаметра дренажной линии можно произ-

водить по формулам равномерного движения на пропуск расчетного расхода в пределах от 60 до 100% полного притока. Причем при пропуске меньшего расхода на расстоянии 0,4 длины от устья дрены может образоваться незначительный подпор. Он предлагает отказаться от запасов в расчетах ввиду значительных колебаний притока в дренаж в течение года.

Вопросы движения жидкости в трубчатой дрене при частичном ее заполнении в условиях присоединения расхода вдоль пути нашли отражение в исследованиях А. Г. Пулатова и К. Ш. Латипова.

Ранее упоминалось, что движение жидкости с присоединением расхода вдоль пути может быть описано с помощью общих уравнений гидродинамики. Попытка использовать эти уравнения путем их осреднения по сечению потока для гидравлического расчета систем внутрипочвенного и капельного орошения, а также закрытого дренажа была сделана М. Г. Хубларяном.

Неустановившееся движение жидкости в трубах в случае равномерного присоединения расхода описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{\lambda}{8R}v^2(v-u)q,\\ &\frac{1}{\rho C^2}\frac{dp}{\partial t}+\frac{\partial v}{\partial x}=q, \end{aligned}\right\} \qquad (200)$$

где v, ρ и p — осредненные по поперечному сечению скорость, плотность и давление; C — скорость распространения звука в капельной жидкости; q — удельный приток (отток); R — гидравлический радиус; λ — коэффициент гидравлического трения; u — проекция скорости присоединяемого (отделяемого) расхода на направление основного потока.

Если в качестве допущений принять, что между направлениями скоростей v и u прямой угол и член $\lambda v/8R$, учитывающий потери на трение, равен его среднему значению по длине трубопровода и по времени, то есть

$$\frac{\lambda v}{8R}\simeq\left(\frac{\lambda v}{8R}\right)_{ср}=a=\text{const}, \qquad (201)$$

то система уравнений (200) упрощается:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}-(a+q)v,\\ &\frac{1}{\rho C^2}\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial v}{\partial x}=q. \end{aligned}\right\} \qquad (202)$$

В свою очередь, эти уравнения приводятся к дифференциальным уравнениям гиперболического типа, причем при $q=0$ известно большое число решений конкретных технических задач.

В предположении, что скорость по длине трубы меняется по линейному закону $v = v_0 \frac{v_0 - v_1}{S} x$, а приток в трубчатую дрену определяется условием $q = \frac{v_0 - v_1}{S}$, М. Г. Хубларян получил следующее решение:

$$h_0 - h_S = \frac{\lambda S}{2gD} \frac{v_0^2}{3}\left(1 + \frac{v_1^2}{v_0^2} + \frac{v_1}{v_0}\right) + \frac{1}{g}(v_1^2 - v_0^2). \quad (203)$$

Формула отвечает установившемуся режиму течения жидкости и получена при следующих условиях:

$$x = 0;\ v = v_0;\ x = S,\ v = v_1.$$

В заключение необходимо отметить, что дальнейшее развитие теории движения жидкости с переменным вдоль пути расходом применительно к нуждам гидротехнического и водохозяйственного строительства должно быть связано с использованием современных ЭВМ. Только применение ЭВМ позволит получить эффективные решения основных дифференциальных уравнений без значительных затрат времени и упрощений, искажающих физическую сущность рассматриваемого явления.

ГЛАВА 5

СТРОИТЕЛЬСТВО ЗАКРЫТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Способы строительства дренажа

В зависимости от глубины залегания грунтовых вод от поверхности земли различают следующие методы строительства закрытого горизонтального дренажа: комплексно-механизированный и полумеханизированный (метод «полки»). Отдельно следует выделить нашедший применение в последние годы бестраншейный способ.

Комплексно-механизированный метод основан на использовании дренажных траншейных и узкотраншейных машин с рабочим органом активного действия. Он применяется в устойчивых и обрушающихся грунтах при уровне грунтовых вод от поверхности более 3 м.

При строительстве дрен в условиях высокого уровня грунтовых вод применяется полумеханизированный метод, при котором открытая траншея с устойчивыми откосами отрывается одноковшовым экскаватором. Чтобы осушить на период строительства основание дрены (полки), глубина траншеи должна превышать проектную отметку дрены на 0,3—0,5 м.

Принципиально новым является бестраншейный способ строительства дренажа с помощью специальной дренажной машины с пассивным рабочим органом. Грунт при этом не разрабатывается, в нем прорезается щель на необходимую глубину, на дне которой формируется дренажная линия. Дренаж, уложенный бестраншейным способом, может быть трубчатым и с закрепленными стенками. Закрепление стенок выполняется механическим, химическим, термическим или каким-либо другим способом.

Независимо от метода строительства все работы по созданию коллекторно-дренажной сети можно разделить на подготовительные, основные, вспомогательные (сопутствующие основным) и заключительные. К подготовительным, как правило, относятся

работы по подготовке трасс дрен; к основным — рытье траншей и щелей, укладка дренажной линии; к вспомогательным — доставка дренажных материалов, их раскладка по трассе дрен; к заключительным — обратная засыпка траншей или заделка щелей, засыпка «корыта», строительство дренажных сооружений, общая планировка площади.

Траншейный способ. Технология строительства дренажа механизированным методом с применением траншейных дреноукладчиков основана на выполнении всех основных операций, кроме подготовки трассы и частично обратной засыпки.

В зависимости от типов дреноукладчиков выполняют следующие подготовительные работы: при дреноукладчиках с автоматизированным регулированием глубины копания — разбивку и грубую планировку, а при дреноукладчиках с нерегулируемым рабочим органом — устройство «корыта» и планировку трассы параллельно уклону дрены.

Планировка пути для дреноукладчика на полосе шириной 3 м осуществляется скрепером, бульдозером, грейдером или этими же машинами в различных комбинациях, в зависимости от величины срезок, дальности транспортировки грунта и наличия машин. При планировке пути дреноукладчика допускаются поперечные уклоны не более 0,01. В последнее время Среднеазиатским научно-исследовательским институтом по ирригации (САНИИРИ) совместно с Государственным специальным конструкторским бюро (ГСКБ) по ирригации разработан способ непрерывного устройства «корыта» под заданный уклон за один проход специальной машиной. Контроль качества планировки трассы дреноукладчика проводится инструментальной съемкой в точках, отмеченных при разбивке трассы.

Работы по рытью траншеи, укладке фильтра и дренажных труб выполняют дреноукладчиком одновременно и непрерывно, начиная от устья дрены. Периодически, через 10—15 м, дреноукладчик загружают фильтрующим материалом с помощью самосвалов с задней и боковой выгрузкой. Используют для этой цели и специальные устройства. Кроме этих операций, при траншейном способе (почти так же, как и при всех других) выполняют бульдозером обратную засыпку дрены грунтом с послойным уплотнением, устройство контрольно-смотровых

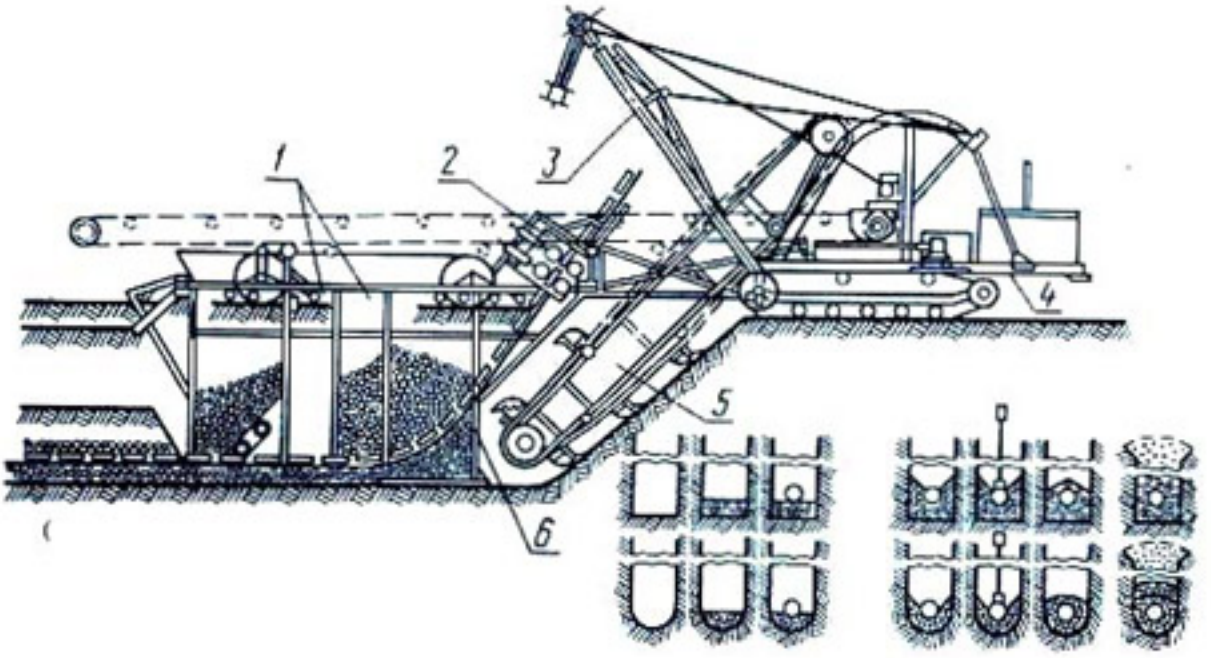


Рис. 32. Последовательность выполнения операций при устройстве закрытого дренажа траншейным дреноукладчиком в сухих грунтах: *1* — бункер; *2* — подающий механизм; *3* — подвеска бункера; *4* — базовый трактор; *5* — ковшовая рама; *6* — трубоукладчик.

колодцев, устьевой части дрены, а также бульдозером или грейдером планировку всего участка, на котором построили дренажную систему.

Последовательность технологических операций при строительстве закрытого дренажа дреноукладчиками Д-301 и ЭД-3,0 траншейным способом представлена на рисунке 32.

При применении экскаваторов - дреноукладчиков Д-659А и Д-659Б, оборудованных системой заданного уклона дна открываемой траншеи, не требуется отрывки «корыта», исключаются скреперы из состава вспомогательных машин, но необходимы установка и натяжение копирного троса. Обратная засыпка траншеи вынутым из нее грунтов в этой модели, а также в дреноукладчике ЭД-3,0 обеспечивается с помощью одного или двух транспортеров обратной засыпки, установленных на экскаваторе-дреноукладчике.

Одним из вариантов технологии механизированного метода строительства дренажа в неустойчивых, водонасыщенных, подверженных оплыванию грунтах — метод строительства с предварительным водопонижением. Он основан на предварительном понижении уровня грунтовых вод ниже проектной отметки дна дрены на 0,6—0,7 м с помощью иглофильтровой установки типа ЛИУ-2

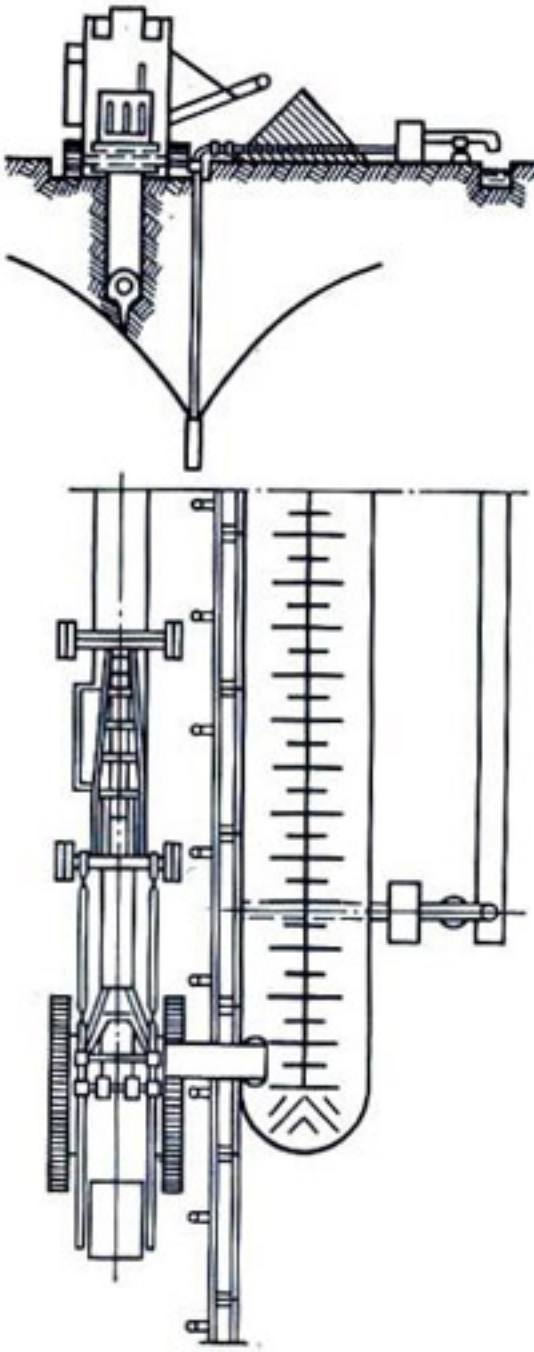


Рис. 33. Схема устройства закрытого дренажа траншейным дреноукладчиком с предварительным понижением грунтовых вод иглофильтровой установкой.

(рис. 33). Она состоит из 24 иглофильтров, располагаемых на расстоянии 2,25 м один от другого. Иглофильтры устанавливают с левой стороны по ходу дреноукладчика на расстоянии 2 м от оси дрены.

Дренажные трубы укладывают в осушенный грунт с помощью дреноукладчика. Установка иглофильтров и процесс водопонижения осуществляются после выполнения трассоподготовительных работ, а их демонтаж — сразу после укладки дрены. Иглофильтры на необходимую глубину устанавливают путем подмыва. Метод строительства с предварительным водопонижением применим на грунтах с коэффициентом фильтрации 1,5—3 м/сут и более (пески, легкие супеси).

Снижение влажности грунта предотвращает его оплывание, нормализует работу ковшей и отвального транспортера экскаватора, что позволяет ему отрывать траншею необходимой глубины с заданным поперечным профилем. Отсутствие гидростатического напора грунтовых вод в результате их понижения способствует увеличению устойчивости вертикальных стенок траншеи.

Узкотраншейный способ. Трубы укладывают в узкую траншею (не шире 25 см) одновременно с ее отрывом и с обязательной немедленной обратной засыпкой. Возможность работы указанным способом в обрушающихся грунтах основывается на непрерывном перемещении узкой щели в плане с такой скоростью, что грунт в стенках щели, удерживаемый силами сцепления в разрезе на плоскости, не успевает обрушиться.

Узкотраншейный способ строительства осуществляется с помощью многоковшового узкотраншейного экскаватора, оборудованного цепным, скребковым, баровым, роторным или шнековым рабочим органом.

Работы по узкотраншейному способу осуществляются с применением тех же схем, что при строительстве дренажа траншейным многоковшовым экскаватором.

При узкотраншейном способе строительства дренажа в большей степени, чем при траншейном, уделяется внимание механизации укладки дренажных труб и фильтрующих материалов. Это объясняется узостью траншеи и невозможностью проводить ручные операции по качественной стыковке труб и обкладке их фильтром. В связи с этим здесь необходимо применять трубоукладчики с механизированной подачей труб и принудительной укладкой, в которых трубы на дно траншеи подаются по спускному желобу цепным или роторным транспортером, а торцы поджимаются фрикционным роликом, гидроцилиндром, цепным или рычажным толкателем.

В САНИИРИ и Голодностепстрое разработан узкотраншейный способ строительства закрытого дренажа на орошаемых землях с применением полимерных труб. Сущность его состоит в устройстве узкой щели шириной 15 см, отрываемой цепным рабочим органом специального дреноукладчика, в которую укладывается дренажная пластмассовая труба с обсыпкой ее песчано-гравийным фильтром. После этого полость щели заливается пульпой, образуемой в результате смешения грунта, вынимаемого из щели, с некоторым количеством воды, подаваемой из емкости. При прокладке дрен в условиях высокого уровня грунтовых вод, если грунты водонасыщены, воду не подают.

Метод «полки». При строительстве дрен полумеханизированным методом выемку дрены с пологими и устойчивыми откосами отрывают одноковшовым экскаватором с перебором против проекта от 0,3 до 0,5 м для понижения уровня грунтовых вод относительно отметки дна дрены. В одном из откосов дрены вручную устраивают полку шириной 0,8—1,2 м, на которую укладывают фильтрирующую подсыпку, трубы. Затем производят их круговую обсыпку фильтрующим материалом. После укладки фильтра дрены присыпают грунтом, уплотняя пазухи (рис. 34). Дрены укладывает бригада из 13—14 человек.

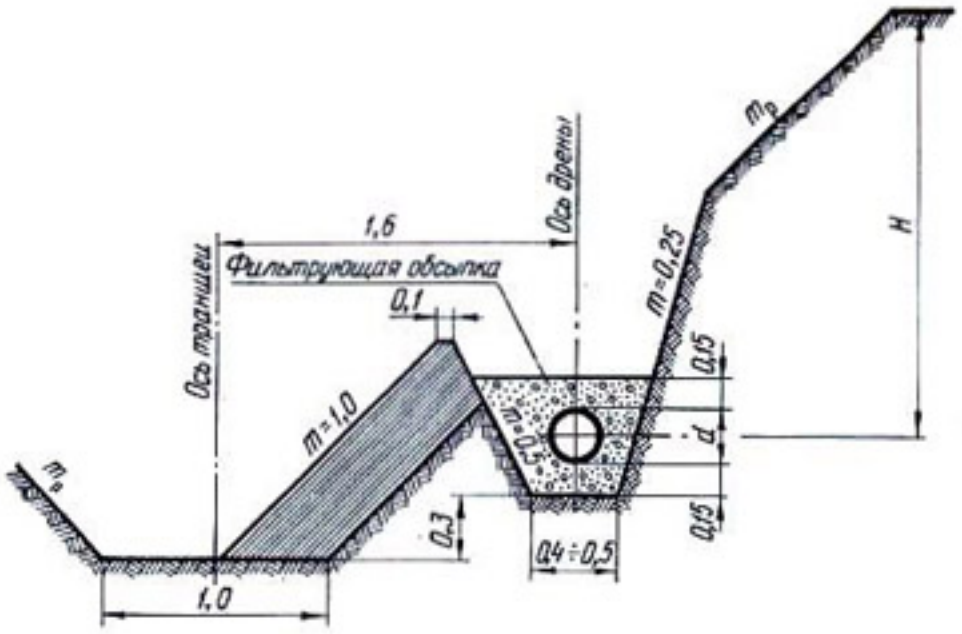


Рис. 34. Схема дренажа, устраиваемого методом «полки». (Размеры в м.)

Окончательно дрены засыпают с помощью бульдозеров: сначала со стороны неиспользованного откоса, а затем с противоположной стороны. Засыпка в такой последовательности предотвращает смещение уложенной закрытой дрены с откоса осушителя. Недостатками этого способа являются: большой объем земляных работ (18—25 м³ выемки грунта на 1 м дрены), низкая производительность и низкий уровень механизации операций — все работы по устройству полки, укладке труб и фильтра производятся вручную. Кроме того, из-за оплывания откосов осушителя затрудняется укладка дренажных труб. В результате стоимость строительства 1 м закрытого дренажа при этом способе получается высокая — 16—18 руб., а производительность — низкая.

Применение полумеханизированного метода в последнее время все более ограничивается. Однако при переустройстве оросительных систем, в процессе которого открытые дрены необходимо углубить и превратить в закрытые, трубчатые, метод «полки», бесспорно, будет иметь дальнейшее применение. Поэтому в САНИИРИ (В. Н. Бердянский, У. Ю. Пулатов и др.) разрабатывается система машин для механизации выемки грунта под полку, укладки фильтра и труб, а также обратной засыпки.

Бестраншейный способ. За последние годы для условий высокого стояния грунтовых вод (до 1—1,5 м от поверхности) в грунтах 1—3 групп, подверженных оплы-

ванию или обрушению, нашел применение бестраншейный способ строительства дренажа.

Сущность бестраншейного способа строительства заключается в укладке непрерывной дренажной трубы и фильтрового материала на дно щели, прорезаемой в грунте на необходимую глубину с помощью пассивного рабочего органа. Возможность полной механизации процесса укладки дрены в широком диапазоне гидрогеологических условий, высокая скорость укладки (500—2000 м/ч), простота и надежность рабочего органа выгодно отличают бестраншейный способ строительства от традиционных — траншейных. Здесь целесообразнее использовать гибкие пластмассовые трубы с синтетическим или песчано-гравийным фильтром.

Основные преимущества бестраншейного способа строительства — простота конструкции агрегата, возможность отрывки щели на больших скоростях, исчисляемых сотнями метров и даже километрами в час с одновременной укладкой труб в любых (в том числе и оплывающих) грунтах.

Бестраншейный способ позволяет полностью механизировать процесс укладки дрены. Он более чем в 10 раз увеличивает производительность труда и в 2,5—3 раза снижает стоимость строительства по сравнению с полумеханизированным. Уровень комплексной механизации при этом способе возрастает в зависимости от конструкции фильтра до 95—98%.

Для бестраншейного способа строительства дренажа в песчаных, супесчаных грунтах с коэффициентом фильтрации $K>1$ м/сут может быть принята такая конструкция дрены, в которой полиэтиленовые гофрированные трубы диаметром 63÷75, 90, 110 и 125 мм обматываются в качестве фильтра синтетической тканью (стеклоткань, стеклохолст, капрон). Для суглинистых и других видов грунтов с меньшей водопроницаемостью применяется дренаж с увеличенным эффективным диаметром за счет использования в качестве фильтра естественной песчано-гравийной смеси. Размеры фильтрующей обсыпки составляют 20×30 см.

Последовательность выполнения операций при осуществлении технологического процесса строительства дренажа бестраншейным способом аналогична траншейному способу. После подготовки трасс бестраншейный дреноукладчик задним ходом по подготовленной трассе

подъезжает к устью и опускает рабочий орган на требуемую глубину в специально подготовленный заходной шурф. Затем дренажную трубу пропускают по спускному желобу через рабочий орган и заякоривают ее конец на дне шурфа. Включают рабочий ход, и дреноукладчик начинает движение до тех пор, пока рабочий орган полностью не внедрится в грунт. После этого движение прекращается. Бункер дреноукладчика загружают песчано-гравийной смесью, и дреноукладчик укладывает дренажную линию до тех пор, пока не израсходуется запас фильтрового материала в бункере.

Затем весь процесс повторяется. По окончании укладки рабочий орган переводится в транспортное положение и дреноукладчик переезжает на новую трассу. Гусеницами трактора-тягача производится закатка щели за 4—6 проходов.

Бестраншейными дренажными машинами рекомендуется закладывать только дрены-осушители. Работать машины начинают от открытого коллектора, заглубляя рабочий орган в откос на необходимую глубину, или от закрытого коллектора с предварительным отрывом шурфа для заглубления рабочего органа.

Машины для строительства дренажа в устойчивых и подверженных обрушению грунтах

Для строительства дренажа на орошаемых землях в устойчивых грунтах в Советском Союзе и за рубежом применяются специальные машины — экскаваторы-дреноукладчики траншейного и узкотраншейного типов. Основной параметр дреноукладчиков — глубина отрываемой траншеи — колеблется в пределах от 2,5 до 4 м, в зависимости от местных условий и заданной нормы осушения. Ширина отрываемой траншеи для траншейных машин с рабочим органом ковшового типа принимается более 0,45 м (обычно 0,6 м). За качеством укладки, стыковки дренажных труб и обсыпки их фильтрующим материалом следит рабочий-трубоукладчик, находящийся в бункере дреноукладчика. При узкотраншейном способе дренажные трубы укладывают в траншеи, отрываемые, как правило, скребковыми рабочими органами многоковшовых цепных или роторных экскаваторов.

Механизированная укладка горизонтального закрытого дренажа на орошаемых землях СССР впервые начала осуществляться в 1957 г. дреноукладчиком конструкции Голодностепстроя. Эта машина представляла собой многоковшовый траншейный экскаватор ЭТУ-353 с навешенным на него приспособлением для одновременной укладки дренажных труб на глубину 2,5 м и полной обсыпки фильтрующим материалом в два слоя. Она имела ряд конструктивных недостатков.

САНИИРИ в тесном сотрудничестве с Голодностепстроем на основе этой машины создал серию дреноукладчиков Д-251, Д-301, Д-351 на базе экскаватора ЭТУ-353 или ЭТУ-354 со специальным прицепным оборудованием. Трубы в этих дреноукладчиках подаются принудительно механизмом, работающим от вала отбора мощности. Бункер устанавливается на ходовую тележку, а не подвешивается к траншейному экскаватору.

В Туркменском институте гидротехники и мелиорации дреноукладчик Д-251 был несколько модернизирован. В плане задняя часть бункера имеет вид трапеции. Передняя часть бункера длиной 0,5 м имеет прямоугольную форму, так как находящееся вблизи от забоя траншеи количество обвалившегося грунта незначительно. Трапецеидальная форма позволяет снизить давление грунта на его стенки при обрушении траншеи. Колея ходовой части бункера для сохранения рабочего положения при обвалах за счет добавления дополнительных ободов увеличена на 0,7 м и равна 3,6 м.

ГСКБ по ирригации на основе всех этих работ создало дреноукладчик ЭД-3,0. За базу принят специальный траншескопатель с рабочим органом в виде ковшовой цепи. Его ходовая система более мощная, в ней использованы детали и узлы от трактора Т-100. Она имеет меньшее удельное давление на грунт. Бункер дреноукладчика навешен на ковшовую раму, что улучшает транспортабельность машины и ее введение в забой. Он разделен на три отсека: в первый и третий засыпают фильтрующий материал для круговой обсыпки дренажной трубы, а во втором находится оператор, следящий за качеством укладки труб, подаваемых на дно траншеи по желобу другим оператором, стоящим на площадке. Дреноукладчик может укладывать трубы на глубину до 3,5 м. Он снабжен обводным транспортером для засыпки траншеи сразу же после укладки труб. При необходимости обводной

транспортер может быть отключен, и грунт с помощью бокового транспортера сбрасывается в отвал слева по ходу движения. Машина работает по спланированной поверхности.

Производительность машины около 200 м в смену, ее обслуживает 3—4 человека.

Всесоюзный научно-исследовательский институт землеройного машиностроения (ВНИИЗеммаш) совместно с Брянским заводом дорожных машин создали экскаватор-дреноукладчик Д-658. Рабочий орган машины Д-658 с полукруглыми ковшами позволяет отрывать траншею глубиной до 4 м при ширине 0,6 м. Двигатель, привод рабочего органа, звездочки турасного вала, ковшовая цепь, верхняя рама и транспортер заимствованы от экскаватора ЭТУ-354. В ходовой части и трансмиссии привода хода использованы детали трактора Т-100М и трубоукладчика Д-804. Двигатель и кабина заимствованы у трактора К-700.

Бункер по конструкции идентичен бункеру дреноукладчика ЭД-3,0, но подвешен к раме, которая опирается через вертикальный шарнир и переднюю раму на тягач, а через горизонтальный шарнир задней опоры с помощью двух гидроцилиндров — на колесную тележку. Каретка с направляющим двутавром не позволяет раскачиваться бункеру вдоль продольной оси дреноукладчика.

Бункер-трубоукладчик жестко крепится к рабочему органу. Бункер состоит из спускного лотка для подачи труб на дно траншеи, отсека для фильтрующего материала и секции для контроля качества стыковки труб. Бункер загружается фильтрующим материалом непосредственно из самосвалов. Металлические щиты, расположенные со стороны загрузки, по мере выглубления сдвигаются к противоположной стенке, что позволяет загружать бункер самосвала при любом его положении по высоте.

Дреноукладчик Д-658 оснащен автоматической системой выдерживания заданного уклона дрены, работающей от копирного троса.

Рабочий орган с бункером-трубоукладчиком поднимается и опускается двумя боковыми гидроцилиндрами плунжерного типа, которые во время работы переводятся в «плавающее» положение. Плоско-параллельное движение рабочего органа относительно тягача обеспечивается двумя двухштоковыми гидроцилиндрами. Это

позволяет при наличии на дреноукладчике автоматической системы выдерживания заданного уклона отказаться от корректирующего устройства.

На машине применяются специальные цепи рабочего органа с шагом 20 мм. Самоочищающиеся ковши имеют полукруглую режущую кромку. Индивидуальные очистители закрывают каждый ковш сверху, что позволяет рабочему органу поднимать из забоя грунт, смешанный с водой.

Экспериментальный экскаватор - дреноукладчик Д-658М создан на базе дреноукладчика Д-658, у которого была переработана конструкция навески трубоукладчика на рабочий орган и применена новая система автоматического управления.

Бункер-трубоукладчик разборный состоит из верхней и нижней секций, соединяемых болтами. Конструкция трубоукладчика позволяет укладывать раструбные и гладкие керамические дренажные трубы диаметром 100—200 мм. При работе с гладкими трубами на верхней секции устанавливается приспособление для обертки труб стеклотканью.

Трубоукладчик имеет три отсека: отсек для установки спускного лотка, отсек для фильтрующего материала и экспериментальный отсек для наблюдения за процессом укладки.

Экскаватор-дреноукладчик Д-659А, созданный ВНИИЗеммаш совместно с Брянским заводом дорожных машин, предназначен для строительства горизонтального дренажа глубиной до 4 м из керамических труб с внутренним диаметром 100—200 мм с одновременной изоляцией их песчано-гравийным фильтром и последующей засыпкой траншеи грунтом. Он может работать в устойчивых и в обрушающихся грунтах. Состоит из тягача, рабочего оборудования, трансмиссии, поперечного и продольного транспортеров, подъемной рамы, трубоукладчика, электрогидросистемы и тяговой лебедки.

Тягач представляет собой двухгусеничную тележку, на основной раме которой смонтированы силовая установка трансмиссия, кабина машиниста и рабочее оборудование. Рабочий орган навешивается на тягач посредством двух рычагов, положение которых можно изменять относительно тягача с помощью гидроцилиндров. Этими же гидроцилиндрами рабочий орган с трубоукладчиком переводится из транспортного положения в рабочее и

наоборот. При работе они находятся в «плавающем» положении.

Подъемная рама — основной несущий и тяговый элемент трубоукладчика. Она шарнирно закрепляется на рабочем органе и при работе крепится дополнительно двумя тягами.

Для начального заглубления рабочего органа подъемная рама вместе с трубоукладчиком может быть поднята гидроцилиндрами. Дополнительные тяги при этом отсоединяют.

Дреноукладчик Д-659А оснащен тремя системами управления рабочим органом и бункером-трубоукладчиком:

система автоматического выдерживания заданного уклона дна траншеи включает щуповой датчик с бесконтактными элементами, вторичный прибор, пульт управления, два электрогидрозолотника и исполнительный гидроцилиндр;

система автоматического поддержания заданного угла наклона рабочего органа к горизонту обеспечивает постоянное заглубление с помощью датчика «Профиль-1» и приставки со стрелочным прибором. Сигналы рассогласования этой системы отрабатываются гидроцилиндрами;

система контроля углового положения бункера-трубоукладчика в траншее выполнена аналогично системе для поддержания постоянного угла наклона рабочего органа. Управление осуществляется вручную, по световой сигнализации. Сигнал рассогласования принимается машинистом, который приводит систему в равновесие гидроцилиндром.

Кроме того, на бункере-трубоукладчике смонтирована механическая система для визуального контроля взаимного положения режущей кромки рабочего органа и опорной лыжи.

В результате модернизации экскаватора-дреноукладчика Д-659А была создана машина Д-659Б с повышенными технико-эксплуатационными показателями.

Следует отметить, что модели дреноукладчиков серии Д-658, Д-659, хотя и позволяют отказаться от устройства «корыта», однако из-за своей сложности, более низкой надежности узлов и меньшей транспортабельности имеют годовую производительность ниже годовой производительности дреноукладчиков ЭД-3,0, равной 35—40 км.

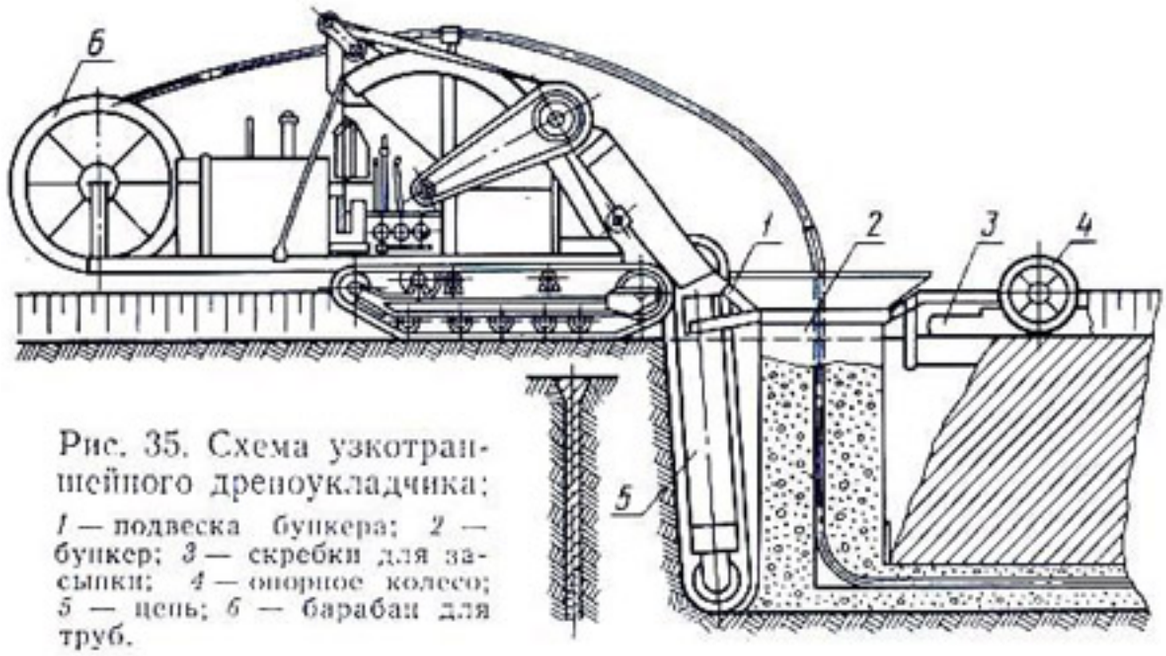


Рис. 35. Схема узкотраншейного дреноукладчика:
1 — подвеска бункера; *2* — бункер; *3* — скребки для засыпки; *4* — опорное колесо; *5* — цепь; *6* — барабан для труб.

Строительство закрытого дренажа из пластмассовых труб узкотраншейным способом осуществляется с помощью дреноукладчика ЭДЩ-251 конструкции САНИИРИ и Голодностепстроя. Дреноукладчик разработан на базе траншейного экскаватора ЭТУ-354 (рис. 35).

Роющий орган представляет собой втулочно-роликовую цепь с двух- и трехрезцовыми режущими элементами. Щелерезный орган наверху оборудован кожухом для приема вынутого грунта и направления его для разгрузки на берму щели. Привод роющего органа осуществляется от турасного вала экскаватора через цепную передачу.

Для предотвращения образования сводов фильтрующего материала направляющая часть бункера-укладчика выполнена так, что проходное сечение внизу больше, чем наверху, то есть боковые стенки наклонены вовнутрь. В нижней части передней стенки бункера установлен нож-подборщик, а задние стенки отсеков (по ходу) оборудованы планировщиками фильтрующего материала.

Ходовое устройство состоит из оси с двумя колесами, оборудованными устройством для очистки их от грязи. Рама ходового оборудования сварной конструкции. С помощью пальцев она соединена с рамой навески. Конструкция крепления такая, что при подъеме органа в транспортное положение рама ходового устройства с колесами поворачивается вокруг пальцев и складывается. К оси ходового оборудования прикреплены скребки

Технические характеристики траншейных дренажных машин

	ЭД-3,0	Д-658М	Д-659Б (Д-659А)
Тип машины	Самоходный гусеничный с полуприцепным бункером-укладчиком	Самоходный гусеничный с навесным бункером-укладчиком	
Эксплуатационная производительность, м/смену	До 200	100	200
Размеры траншеи, м:			
глубина	До 3,0	До 4,0	До 4,1 (4,0)
ширина	0,6	0,8	0,6
Рабочий орган:			
число ковшей	—	26	19 (16)
вместимость ковшей, л	33	75	55 (65)
скорость ковшовой цепи, м/с	1,17	0,617; 1,063; 1,23	0,96
Способ выдерживания заданного уклона	По спланированному «корыту»	По копирному тросу	По копирному тросу
Рабочая скорость, м/ч	8 скоростей 14,2÷132	8 скоростей 51,8÷453	6 скоростей 30÷113
Транспортная скорость, км/ч	8 скоростей 0,46÷7,0	4 скорости 1,385÷3,8	5 скоростей 1,42÷5,44
Вместимость бункера для фильтрующего материала, м³	2,5	4,0	3,5
Среднее удельное давление на грунт, Па	—	0,58	0,56 (0,53)
Габаритные размеры в транспортном положении, м:			
длина	12,75	13,4	19,6
ширина	4,15	5,5	5,9 (4,6)
высота	6,15	4,3	8,2
Масса машины, т	21,0	43,0	40,5 (32,65)
Обслуживающий персонал, чел.	3	4	4

для обратной засыпки щели вынутым из нее грунтом. Обеспечена возможность регулирования положения отвалов в вертикальной плоскости.

Барабан для бухты пластмассовых труб сварной конструкции. Передняя стенка его съемная. Барабан установлен впереди экскаватора на специальном кронштейне на подшипниках скольжения.

При помощи щелевых дреноукладчиков построено чуть более 30 км опытного дренажа из-за целого ряда конструктивных недостатков модели и быстрого износа режущей цепи.

Из зарубежных траншейных дреноукладочных машин представляет интерес дреноукладчик Buckey 411-АД (США), специально предназначенный для строительства глубокого дренажа.

Машины и оборудование для строительства дренажа в условиях высокого стояния грунтовых вод

Для строительства закрытого дренажа в условиях высокого стояния грунтовых вод полумеханизированным методом в качестве основных механизмов для выемки грунта применяются одноковшовые экскаваторы с различной емкостью ковша, а для обратной засыпки дренажных траншей — бульдозеры.

Для строительства горизонтального трубчатого дренажа глубиной до 2,8 м в обводненных и неустойчивых грунтах Научно-исследовательским институтом строительного производства (НИИСП) Госстроя УССР совместно с ГСКБ по ирригации Главсредазирсовхозстроя разработана конструкция шнекового дреноукладчика БШУ-4.

Машина предназначена для укладки гибких витых длинномерных дренажных труб из поливинилхлорида диаметром 100, 125 и 150 мм с фильтром из стекловолокнистого рулонного материала.

Дреноукладчик оборудован шнековым рабочим органом, принцип действия которого основан на резании грунта без образования траншей. Внутри полого вала шнека расположена неподвижная направляющая труба, изогнутая в нижней части в виде колена. По ней при работе дреноукладчика проходит дренажная труба из ПВХ с фильтром и укладывается на дно прорезаемой щели.

Эта машина пока имеет значительные конструктивные недостатки, как и щелевой дреноукладчик.

Весьма перспективными и высокопроизводительными машинами, применяемыми в сложных гидрогеологических условиях (высокое стояние грунтовых вод, наличие

водонасыщенных грунтов, подверженных оплыванию и др.), являются бестраншейные дреноукладчики. Рабочий орган — пассивный нож.

Проведенные ВНИИГиМ исследования показали, что при бестраншейном строительстве дренажа на орошаемых землях эффективнее ступенчатый рабочий орган. Соотношение между максимальной шириной режущей кромки и глубиной резания подбирается для каждой ступени таким образом, чтобы уплотнение грунта при прорезании щели было минимальным.

При резании грунтов естественного сложения по глубине щели можно выделить три зоны, различающиеся между собой характером деформации грунта от лобовой кромки рабочего органа. В нижней части (зона уплотнения — $H_{упл}$) грунт подвергается упруго-пластичному сжатию и уплотняется в стенки и дно щели. Наименьшее сопротивление резанию в этом случае может быть достигнуто при вертикальном положении режущей кромки (угол резания 90°) и придании ей заостренной формы (угол заострения 45—60°). В средней (переходной — $H_{пер}$) зоне начинает сказываться влияние открытой поверхности грунта. Именно в этой зоне под воздействием режущей кромки происходит отрыв или сдвиг впереди и вышележащей массы грунта в сторону поверхности земли. Наименьшее сопротивление резанию обеспечивает режущая кромка с углом резания 30—36° и углом заострения 180°. В третьей зоне (зона рыхления — $H_р$), непосредственно примыкающей к поверхности земли, спереди и с боков рабочего органа наблюдается дальнейший выпор и дробление грунта, уже сдвинутого в переходной зоне. Оптимальным углом резания для этой зоны остается угол 30—36° при заострении режущей кромки 45—60°. Таким рабочим органом в настоящее время оборудуются бестраншейные дреноукладчики БДМ-301А (рис. 36).

Минимальная энергоемкость, как показали опыты, характерна для рабочего органа с максимально возможной (без образования зоны уплотнения) глубиной резания.

Учитывая, что наиболее типичные в зоне орошения гидрогеологические условия представлены грунтами второй категории, где среднее тяговое сопротивление при глубине 2,5—3 м не превышает 500 кН, бестраншейный дреноукладчик комплектуется двумя тракторами ДЭТ-250 класса 25 т, обладающими автоматической бес-

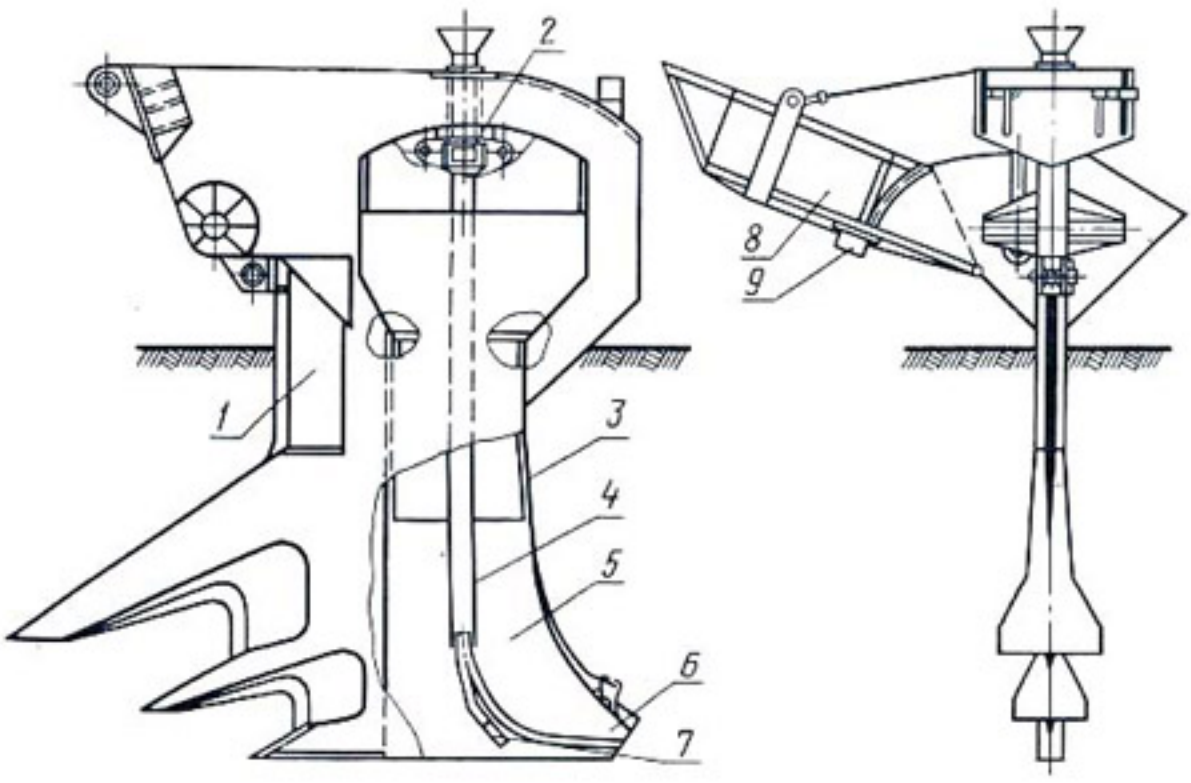


Рис. 36. Схема рабочего органа бестраншейного дреноукладчика:
1 — режущая кромка ножа; *2* — вибропобудитель; *3* — подвижный бункер; *4* — полость для подачи трубы; *5* — неподвижный бункер; *6* — выпуск трубы; *7* — следящее устройство; *8* — ковш загрузчика; *9* — упор.

ступенчатой электромеханической трансмиссией. На одном размещается навесное оборудование для укладки дренажа, а второй является тягачом и соединен с первым с помощью специальных сцепных рам и быстроразъемного соединения, позволяющего легко маневрировать при переездах с одной рабочей позиции на другую. Самым перспективным трактором для использования в качестве базового в дренажной машине является Т-330, имеющий гидравлическую трансмиссию.

При глубинах меньше 2 м возможно применение в качестве тягачей спаренных тракторов Т-130. Модель такого дреноукладчика для глубин 1,5—2 м разработана ГСКБ по ирригации Главсредазирсовхозстроя.

Одновременно с поисками оптимальных форм и параметров пассивного рабочего органа при разработке бестраншейной дренажной машины большое внимание уделяется выбору конструкции и параметров его навески на базовую машину, так как от параметров навесной системы рабочего органа существенно зависит точность укладки дренажной линии и проходимость базового трактора. Влияние на точность укладки дрены колебаний усилия резания в результате неоднородности сло-

жения и анизотропности физико-механических свойств грунтов по глубине резания и по длине трассы исключили выбором конструкции и параметров навесной системы дреноукладчика.

Маятниковая навеска рабочего органа, принятая для бестраншейного дреноукладчика БДМ-301А, должна иметь навесную раму определенной длины, удовлетворяющей условию: $M_{загл} \geqslant M_{выгл}$.

Для предотвращения перезаглубления рабочего органа рама навески снабжается управляемыми с помощью гидроцилиндров лыжами, которые при работе должны опираться на грунт впереди рабочего органа. Необходимо отметить, что опорная площадь лыж выбирается из условия максимально допустимого удельного контактного давления на грунт под лыжей. Одновременно было принято, что при использовании ступенчатого рабочего органа длина навесной рамы должна быть минимальной (рис. 37). Это существенное преимущество, так как оно позволяет снизить габариты и металлоемкость всей установки и обеспечить устойчивость и проходимость дренажной машины в транспортном положении.

В конструкции рабочего органа бункер для укладки песчано-гравийной смеси монтируется непосредственно в теле ножа, сразу за его режущей кромкой и представ-

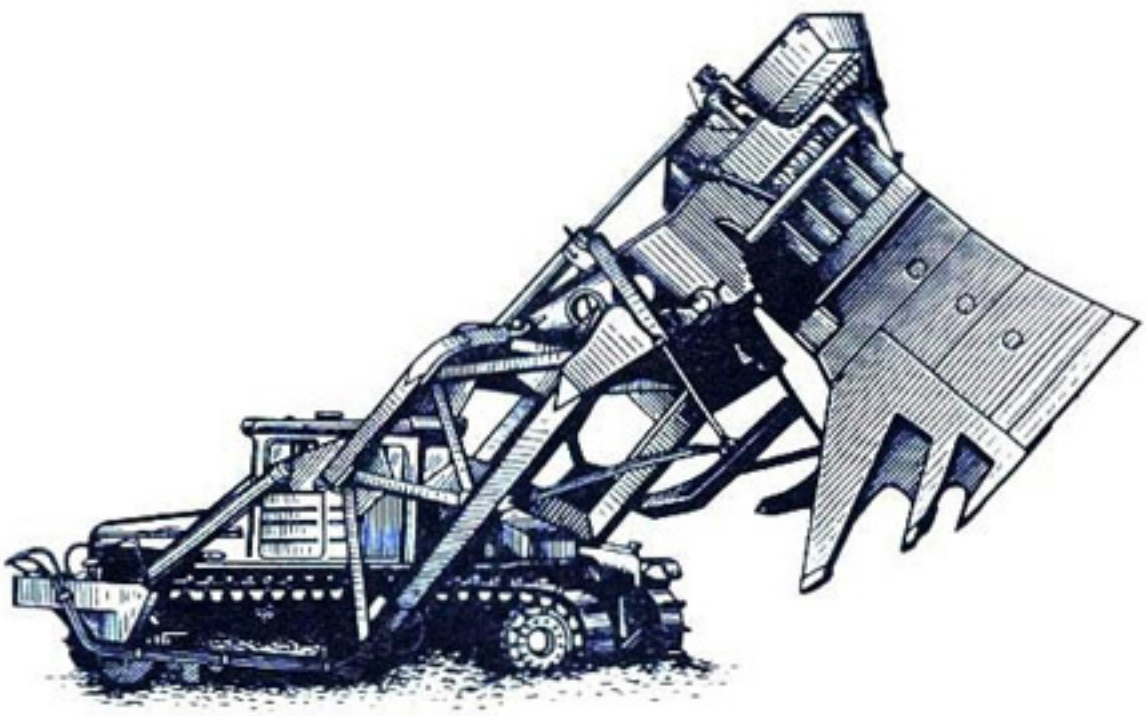


Рис. 37. Бестраншейный дреноукладчик в транспортном положении.

ляет единый с ножом конструктивный узел. Такое решение позволило уменьшить площадь боковых поверхностей рабочего органа, защемленных грунтом, и, следовательно, снизить тяговое сопротивление за счет уменьшения потерь на трение по этим поверхностям. Одновременно зона укладки дренажной трубы и фильтра была максимально приближена к режущей кромке, что позволило совместить во времени процесс прорезания полости под дрену с ее укладкой. Чтобы предотвратить оплывание или выпор разжиженного грунта в полость для укладки трубы и песчано-гравийного фильтра, эта зона защищена боковыми щитками, представляющими собой продолжение боковых стенок рабочего органа.

В приемной части бункера рабочего органа, представляющей собой откидной ковш вместимостью 2,5 м^3, в который загружается песчано-гравийная смесь из транспортных средств, устанавливается решетка, исключающая попадание в спускную часть фракций размером более 20 мм. Сам бункер аналогичен по устройству другим.

Форма и параметры пассивного рабочего органа дреноукладчика БДМ-301А позволяют иметь минимальное тяговое сопротивление, а также обеспечивают минимальное нарушение (уплотнение) естественной структуры грунта в придренной зоне, что выгодно отличает его от рабочих органов аналогичных машин, например бестраншейных дреноукладчиков английской фирмы «Баджер» или западногерманской фирмы «Корнелиус».

Создание бестраншейных дреноукладчиков в нашей стране и за рубежом началось практически одновременно. В конце 50-х годов дреноукладчики бестраншейного типа были созданы в Австрии, Англии, ФРГ, ГДР, Финляндии, США, Нидерландах. Однако большая часть этих машин предназначена для укладки дренажа на глубину 1,2—1,7 м, то есть применима для строительства дренажа только в зоне осушения.

Из всего многообразия бестраншейных машин для укладки дренажа в зоне орошения могут быть использованы только две машины: «Badger Major» фирмы «Hadswell Badger Ltd» (Англия) и дренажный плуг фирмы «Land Improvement and Devellopment Company» (LYDCO) (США). Максимальная рабочая глубина первой составляет 2,75 м, второй — 1,8 м. Обе машины могут быть применены для укладки дрен с песчано-гравий-

ным круговым фильтром. Эксплуатационная производительность этих машин находится, как и у БДМ-301, в диапазоне 2000—3000 м/смену.

Методы расчета основных параметров дренажных машин

Основное условие, обеспечивающее устойчивую работу дренажных машин в различных грунтах, — достаточная мощность двигателя, необходимая для привода рабочих органов дренажной машины и преодоления тяговых сопротивлений, возникающих при взаимодействии рабочего органа с грунтом. Для бестраншейных дреноукладчиков главным является номинальное тяговое усилие, которое способна развивать дренажная машина. Не менее важный параметр, характеризующий работу дреноукладчиков, — производительность.

Суммарную мощность двигателя экскаватора-дреноукладчика можно определять по следующей формуле:

$$N_{дв} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, \qquad (204)$$

где N_1 — мощность, потребная для привода ковшовой цепи землеройного рабочего органа; N_2 — мощность, необходимая для привода отвального и обводного транспортеров; N_3 — мощность, необходимая для перемещения базовой машины; N_4 — мощность, необходимая для перемещения прицепного оборудования дреноукладчика.

А. М. Кушнер потребную мощность на привод ковшовой цепи рекомендует определять по формуле

$$N_1 = \frac{0{,}075}{\eta_{пц}}\left[\frac{П_т}{2{,}7\cdot 10^5 \eta_ц}\left(K_1 + \frac{\gamma_{гр} H_0}{2} + \gamma_{гр} H_0\right) + K_0 \frac{P_{о.к} v_{к.ц}}{75}\right], \qquad (205)$$

где $П_т$ — техническая производительность дреноукладчика; H_0 — высота подъема грунта от поверхности земли до точки разгрузки; $\eta_д$ и $\eta_{пц}$ — к. п. д. ковшовой цепи и ее привода; K_1 — коэффициент энергоемкости копания, определяемый экспериментально; $\gamma_{гр}$ — средняя плотность грунта; $P_{о.к}$ — усилие, необходимое для очистки ковша; K_0 — коэффициент, учитывающий вязкость грунта в ковше, определяемый экспериментально; $v_{к.ц}$ — скорость ковшовой цепи.

N_2 и N_3 определяются по известным методикам и формулам.

$$N_4 = \frac{W_{общ} v}{2{,}7\cdot 10^5 \eta}, \qquad (206)$$

где v — рабочая скорость дреноукладчика, м/ч; η — к. п. д. привода ходовой части базовой машины дреноукладчика; $W_{общ}$ — общее тяговое сопротивление прицепного оборудования.

$$W_{\text{общ}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \qquad (207)$$

где W_1 — сопротивление копанию ножом-подборщиком (определяется экспериментально); W_2 — сопротивление раскладке фильтрующего материала, зависящее от многих факторов и состоящее из сопротивления от трения планировщиков нижней части бункера о фильтрующий материал и сопротивления сдвига его (определяется экспериментально); W_3 — сопротивление перемещению бункера от воздействия обрушившегося грунта; W_4 — сопротивление перекатыванию колес бункера.

$$W_3 = \varepsilon S_0 N_s f_{\text{тр}}, \qquad (208)$$

где ε — коэффициент, учитывающий изменение поверхности трения; S_0 — площадь боковых стенок бункера; N_s — номинальная сила давления грунта на боковые стенки бункера; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения от скольжения стали по грунту.

$$W_4 = (G_6 + G_\Phi + G_\text{т} + G_{\text{гр}}) f_{\text{пер}}, \qquad (209)$$

где G_6, G_Φ, $G_\text{т}$ — масса соответственно бункера с ходовой частью, фильтрующего материала и дренажных труб, находящихся в бункере; $G_{\text{гр}}$ — вертикальная составляющая силы давления обрушившегося грунта на бункер; $f_{\text{пер}}$ — коэффициент сопротивления перекатыванию колес бункера по трассе.

А. М. Кушнер предлагает применять в дреноукладчике передвижную опалубку для защиты бункера от воздействия обрушивающегося грунта. Тогда в уравнение суммарной мощности двигателя дополнительно вводятся составляющие: мощность, необходимая для привода механизма очистки приемного бункера, N_5 и мощность, необходимая для привода шестеренчатого насоса гидросистемы щитов опалубки, N_6.

Условиями нормальной работы экскаватора-дреноукладчика без нарушения технологического процесса в результате защемления бункера обрушившимся грунтом и без возникновения непреодолимых сопротивлений передвижению базовой машины являются:

$$T_{\text{тяг}} > W_{\text{общ}}, \qquad (210)$$

$$M_{\text{загл}} \geqslant M_{\text{выгл}}, \qquad (211)$$

где $T_{\text{тяг}}$ — тяговое усилие, развиваемое базовой машиной дреноукладчика; $M_{\text{загл}}$ и $M_{\text{выгл}}$ — заглубляющий и выглубляющий моменты относительно передней опоры бункера.

Силу сопротивления грунта резанию для нескольких режущих элементов, участвующих одновременно в работе в узкотраншейном дреноукладчике, М. С. Мурада-

гаев рекомендует определять по следующей формуле:

$$P_{\text{р}}^{\text{с}} = \mu\, b(\delta + K_0) \sum_{i=1}^{n} C_i, \qquad (212)$$

где $P_{\text{р}}^{\text{с}}$ — сила сопротивления грунта резанию; μ — коэффициент, учитывающий влияние угла резания; b и δ — ширина и толщина стружки грунта; K_0 — коэффициент, характеризующий отношение $P_\tau \delta / P_\delta$; P_τ — сила сопротивления, возникающая вследствие трения режущего элемента о грунт; P_δ — сила сопротивления грунта чистому резанию при воздействии на него одним режущим элементом; C_i — показатель твердости грунта, который характеризуется числом ударов ударника ДорНИИ.

Переход от сил сопротивления грунта резанию к потребляемой мощности осуществляется на основе общеизвестных методик и формул.

Тяговое сопротивление рабочего органа бестраншейной дренажной машины может быть определено теоретически по методике, разработанной Е. Д. Томиным, В. В. Кузнецовым и В. П. Соколовым (1977).

Экспериментальные исследования позволили выявить влияние формы, параметров рабочего органа и физико-механических свойств грунтов на соотношение размеров зон резания по глубине и дать эмпирические формулы для их определения. Одновременно были получены зависимости и формулы для расчета тяговых сопротивлений рабочего органа, учитывающие наличие трех зон и качественные различия деформаций грунта в них.

Основные факторы, влияющие на соотношение зон по глубине в однородных грунтах при оптимальном угле резания, равном 30—35°, — ширина рабочего органа и твердость грунта:

$$\left.\begin{aligned} H_{\text{кр}} &= H_{\text{р}} + H_{\text{шер}} = ab, \\ H_{\text{упл}} &= H_{\text{общ}} - H_{\text{кр}} = H_{\text{общ}} - ab, \end{aligned}\right\} \qquad (213)$$

где a — эмпирический коэффициент, зависящий от твердости грунта ($a=3$ при $C=1\div4$; $a=3{,}5\div4$ при $C=5\div8$; $a=4{,}5\div5$ при $C=9\div15$); b — ширина рабочего органа, см; $H_{\text{кр}}$ — критическая глубина, см; $H_{\text{общ}}$ — общая глубина резания, см.

В таблице 11 приведены значения тяговых сопротивлений рабочего органа бестраншейного дреноукладчика для глубины резания 3 м в зависимости от твердости грунта. Данные таблицы составлены на основе многочисленных замеров в натурных условиях при дренировании орошаемых земель в совхозах Голодной степи бестраншейным дреноукладчиком БДМ-301А.

Таблица 11. **Твердость грунта и тяговые сопротивления бестраншейного дреноукладчика при глубине резания 3 м**

Показатели	Категория или группа грунта (условно)		
	I	II	III
Средняя по глубине твердость по твердомеру ДорНИИ, число ударов	1÷4	5÷8	9÷15
Среднее тяговое сопротивление для категории, кН	240	480	960

Сравнение данных, полученных расчетным путем, с экспериментальными показывает их хорошую сходимость (расхождение в пределах 12—15%).

Установлено, что в зоне орошения наиболее распространены грунты II группы, поэтому вероятность взаимодействия дреноукладчика с ними составляет 50% и более. Приведенная условная классификация грунтов по трудности их разработки пассивным рабочим органом позволяет осуществить предварительный выбор класса базового трактора и тягачей.

Для практических расчетов с целью прогнозирования возможных тяговых сопротивлений рабочего органа бестраншейного дреноукладчика в зависимости от основных характеристик разрабатываемых грунтов, параметров режущего инструмента, режимов резания и технологических приемов ведения работ можно пользоваться специально разработанными номограммами. Они построены по результатам количественного анализа на электронной модели дифференциального уравнения, которое определяет силы сопротивлений грунтовой массы с учетом динамических явлений, происходящих при движении ножа в грунте для случая приведения его массы к одной материальной точке (Томин, Гладков, 1977). Дифференциальное уравнение записывается в следующем виде:

$$F_т = m_н\ddot{x} + c\dot{x} + F_{гр}\sin\alpha + F_{тр.лоб}\cos\alpha + F_{тр.бок}, \quad (214)$$

где $m_н$ — масса ножа; $\ddot{x}$ — ускорение ножа; $c\dot{x}$ — составляющая силы трения, пропорциональная скорости ножа; $F_{гр}$ — основная сила, действующая перпендикулярно к лобовой поверхности ножа, $F_{гр} = P_{гр}S_{лоб}$; $F_{тр.лоб}$ — сила трения, возникающая вследствие скольжения грунта по лобовой поверхности ножа, $F_{тр.лоб} = P_{гр}(S'_{лоб}\varphi' + S''_{лоб}\varphi'')$; $P_{гр}$ — давление грунтовой массы, препятствующее

продвижению пассивного рабочего органа; α — угол резания; φ' — коэффициент трения грунта по металлу; φ'' — коэффициент трения грунта по грунту; $S''_{лоб}$ — площадь лобовой поверхности ножа; $S'_{лоб}$ и $S''_{лоб}$ — площадь лобовой поверхности ножа до и ниже критической глубины; $F_{тр.бок}$ — сила трения, возникающая вследствие скольжения грунта по боковым поверхностям ножа, $F_{тр.бок} = P_{бок.ср} S_{бок} (0{,}2\varphi' + 0{,}8\varphi'')$; $P_{бок.ср} = \gamma_{гр} H_{общ}/2$ — среднее естественное давление грунта; $S_{бок}$ — площадь боковых поверхностей ножа.

Дифференциальное уравнение выведено на основе реологической модели грунта, разработанной в соответствии с теоретическими концепциями Н. Н. Маслова и А. А. Вовка, и математического описания процесса взаимодействия рабочего органа с грунтом. Для глубокого резания (глубина до 2,5 м, ширина ножа $B = 0{,}25$ м) построены номограммы: с целью определения критического напряжения $P_{кр}$ в зависимости от общего сцепления грунта $C_ж$, угла внутреннего трения φ и средней плотности грунта $\gamma_{гр}$ (рис. 38, *а*), а также для определения тягового сопротивления $F_т$ в зависимости от критического напряжения грунта $P_{кр}$, показателя экспоненты τ, то есть $P = f(x)$, и скорости резания v (рис. 38, *б*).

Техническую производительность землеройных рабочих органов траншейных и узкотраншейных дренажных машин рассчитывают по общеизвестным формулам:

$$\left.\begin{aligned} П_т &= 60\, F v_р, \\ П_т &= \frac{60\, LF}{T}, \end{aligned}\right\} \qquad (215)$$

где F — площадь поперечного сечения траншеи; $v_р$ — рабочая скорость машины; L — длина дрены; T — время прокладки дрены.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5,$$

где $t_1 = L/v$ — время чистой прокладки дрены; t_2 — время заглубления и выглубления рабочего органа и установки на заданный уклон; t_3 — время установки и заправки труб; t_4 — время поворотов; t_5 — время холостого хода.

Техническая производительность в метрах уложенной дрены $П_т = 60L/T$. Сменная производительность бестраншейного дреноукладчика определяется по следующей формуле:

$$П_д = \frac{T_{см} k_{см} k_г}{\frac{1}{v} + \frac{1}{v_x} + \frac{\Sigma t}{L} + \frac{b^2 - 0{,}785\, d^2}{Q}\, t_{загр}}, \qquad (216)$$

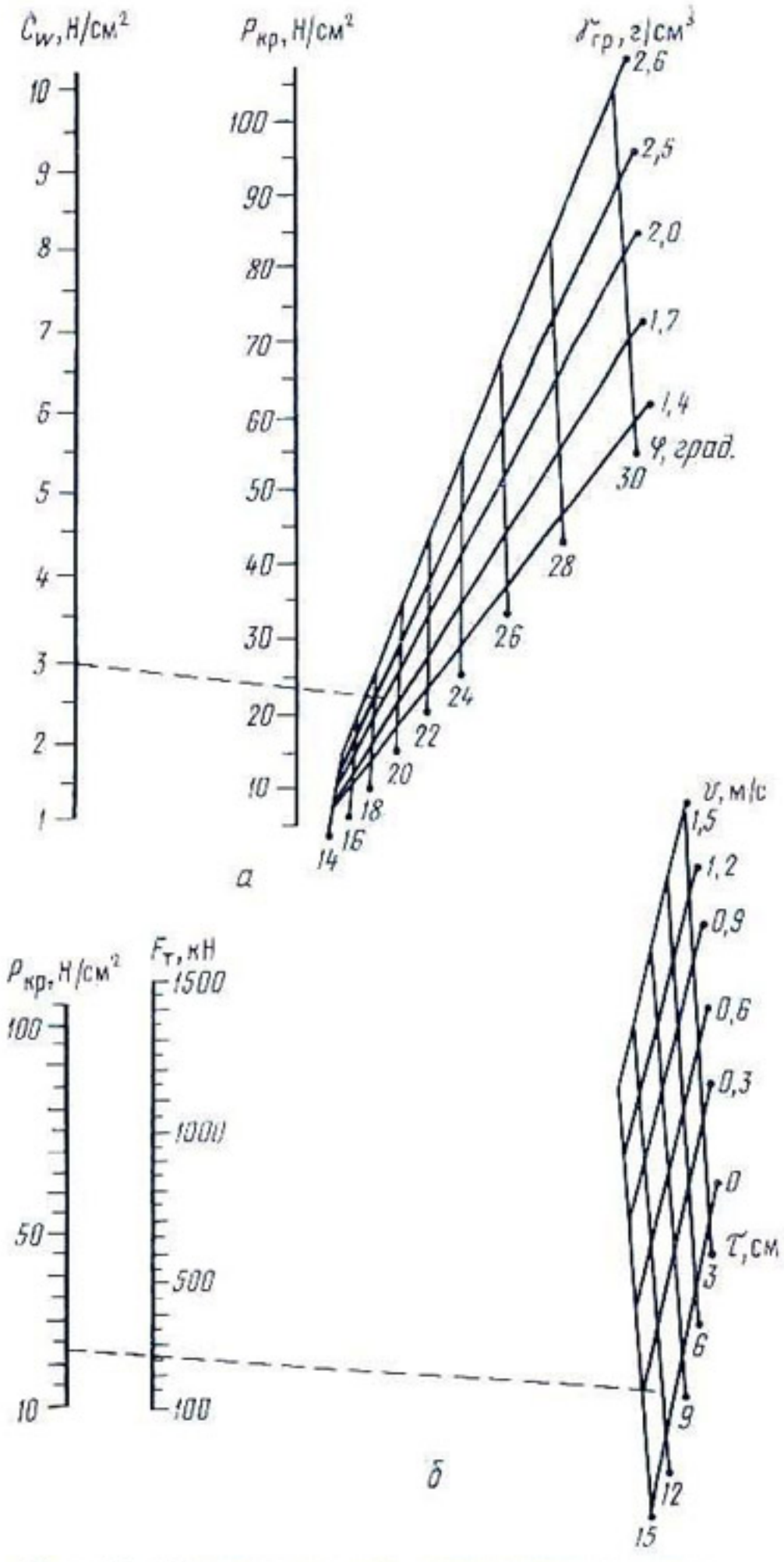


Рис. 38. Номограммы для определения критического напряжения (*а*) и тягового сопротивления (*б*) бестраншейных дреноукладчиков.

где $П_д$ — сменная производительность дреноукладчика; $T_{см}$ — продолжительность рабочей смены; $k_{см}$ — коэффициент использования сменного времени; $k_г$ — коэффициент готовности технологического процесса; $v_х$ — скорость перемещения дреноукладчика при переезде с дрены на дрену; d — диаметр дренажных труб; Q — вместимость бункера дреноукладчика; $t_{загр}$ — продолжительность одной загрузки бункера; Σt — суммарное время на установку дреноукладчика в забой и выглубление рабочего органа по завершении укладки.

Организация и производство работ при строительстве дренажных систем

Устройство профилированного «корыта» производится преимущественно скреперами — продольной разработкой. В случае отсутствия скреперов используют бульдозеры. Сначала при поперечных ходах осуществляется первичная разработка грунта с недобором на 15—20 см, затем при продольных ходах отделывается «корыто» до проектных отметок.

Грунт из основной и дополнительной выемок укладывают с правой стороны по уклону дрены на расстоянии 10—12 м от ее оси. Левая сторона должна оставаться свободной, так как на ней производятся операции, связанные с работой дреноукладчика (подвозка дренажных труб, загрузка бункера фильтрующим материалом и др.).

После контрольной геодезической съемки «корыто» проверяется и сдается машинисту дреноукладчика для производства работ.

Если срезка грунта при планировке пути дреноукладчика превышает 50 см, то для успешной работы машин должно выполняться условие свободного размещения отвала грунта, вынимаемого из траншей. Когда высота подъема транспортера оказывается меньше суммы высот отвала грунта и основной выемки, то с правой стороны (по уклону дрены) от нее разрабатывается дополнительная выемка, глубина которой H определяется по формуле

$$H = H_0 + H_1 - H_2,$$

где H_0 — высота отвала; H_1 — глубина основной выемки; H_2 — оптимальная высота подъема транспортера от опорной поверхности гусениц экскаватора.

Основную и дополнительную выемки выполняет один и тот же механизм.

Перед строительством дрены на трассе раскладывают детали колодцев, дренажные и концевые трубы.

Особенно дорого обходится доставка керамических труб, расходы на которую достигают 50% их первоначальной стоимости, а потери труб при этом (бой) составляют 5—10% и более. Керамические трубы доставляют с завода-изготовителя автотранспортом или по железной дороге с последующей перегалкой на автотранспорт. С приобъектного склада трубы перевозят на трассы дрен.

Трубы в зависимости от технологии строительства дренажа и применяемых механизмов развозят и раскладывают двумя способами:

развозят вдоль трассы будущей дрены и раскладывают в линию одновременно с движением транспортного средства;

раскладывают вдоль трассы в пакетах или контейнерах.

Пластмассовые дренажные трубы и детали благодаря меньшей массе и лучшим механическим свойствам намного удобнее для перевозок, чем керамические. Поэтому доставка пластмассовых дренажных труб может быть выполнена с малыми затратами труда и без помощи сложных приспособлений и устройств.

Бухты перевозят в кузовах автомобилей (прицепов) стоймя. Связки хлыстов перевозят так, чтобы исключить их провисание более чем на $^1/_3$ длины труб.

На приобъектном складе бухты труб перематывают на металлические барабаны круглой формы и одновременно, если это нужно, обертывают синтетическим фильтром.

На участок трубы доставляют трубовозами. Барабаны, уложенные параллельно дну кузова, разгружают с помощью крана, а расположенные перпендикулярно — с помощью управляемых кронштейнов.

Наиболее объемная транспортная операция по подготовке к дреноукладке — завоз фильтра. Фильтрующий материал при строительстве дренажа любыми типами дреноукладчиков механизированным способом завозится непосредственно к дрене и раскладывается вдоль траншеи или в приобъектные склады. Затем с помощью погрузчика или экскаватора с ковшом вместимостью 0,15—0,25 м³ фильтр загружают в самосвалы, подвозящие его к дреноукладчикам. Для удобства подачи фильтра в бункер дреноукладчика эти самосвалы оборудуют специальными приспособлениями к кузову. Вместимость кузова самосвала должна быть равна вмести-

мости бункера дреноукладчика, чтобы не было потерь фильтрующего материала.

Приобъектные склады размещают вдоль полевых дорог таким образом, чтобы расстояние от них к дреноукладчикам не превышало 3 км. Но необходимо учитывать, что на каждом складе теряется нижний слой песка толщиной 10 см и более, поэтому чрезмерное увеличение числа складов увеличивает потери фильтрующего материала.

Для подготовки к работе необходимо:

поставить экскаватор в исходное положение;

заглубить ковшовую раму в стыке устьевого сооружения и дрены, а затем отрыть траншею длиной 5 м на проектную глубину;

остановить экскаватор и опустить бункер в траншею;

подготовить бункер к работе (произвести сцепку с экскаватором, заполнить трубоукладчик дренажными трубами, загрузить первый и второй отсеки бункера фильтрующим материалом).

На пути дреноукладчика в створе правой гусеницы через каждые 100 м устанавливают вехи высотой 2—2,5 м, по которым ведется ориентировка движения при работе.

При движении дреноукладчика типа Д-301 давление по опорной поверхности гусеницы экскаватора перераспределяется и увеличивается к заднему катку из-за дополнительного тягового сопротивления, возникающего от бункера. Кроме того, иногда передняя часть экскаватора поднимается на 15—20 см от опорной поверхности и не участвует в работе. Это снижает его тяговые свойства и проходимость. Когда максимального тягового усилия экскаватора (60 кН) недостаточно для преодоления сопротивления бункера, зажатого в траншее, надо применять дополнительный тяговый трактор.

Если дрена впадает в открытый коллектор, то траншея в концевой части отрывается без укладки дренажных труб и фильтра. Этот участок является основанием для укладки концевых труб. Здесь глубина траншеи должна быть меньше на толщину подстилающего слоя фильтра, что достигается соответствующим заглублением ковшовой рамы. Для регулирования глубины верхняя дуговая рама экскаватора размечается с точностью до 1 см. При достижении требуемой глубины включают рабочий ход и начинают отрывать траншею.

Вместимость бункеров современных дреноукладчиков достигает 5,5 м³, что обеспечивает укладку 8—10 м дрены. Поэтому бункер загружают через каждые 10—15 мин. Булыжники диаметром 100—150 мм, попадающиеся в фильтрующем материале, задерживают его выход из бункера. Их удаляют вручную. Это снижает производительность труда и вызывает дополнительные затраты.

В некоторых случаях бункер дреноукладчика засыпают гравийным фильтром с помощью гусеничной машины типа ГТ-2,5, боковых ленточных транспортеров, установленных на тележке, или машин, оборудованных рабочими органами в виде ковша. Часто бункер заполняют непосредственно из самосвалов с боковой или задней разгрузкой.

В процессе работ необходим периодический контроль за соблюдением следующих требований:

уклон дрены при укладке должен контролироваться через каждые 10 м;

исполнительные отметки верха дренажных труб на целых и плюсовых пикетах должны проверяться через каждые 50 м (они не должны расходиться с проектными более чем на 0,1 внутреннего диаметра трубы). Например, при укладке труб с внутренним диаметром 150 мм допускается отклонение ±15 мм;

в пределах 50-метрового отрезка дрены допускается один 10-метровый участок, уложенный с нулевым уклоном, при условии, что остальные имеют положительный уклон;

внутри каждого 10-метрового участка не должно быть видимых отклонений труб от прямолинейного расположения.

После укладки дрены производится контрольная нивелировка положения труб по верхней образующей дрены. Фактические отметки положения уложенных труб в проверенных точках заносят в исполнительный продольный профиль дрены. Окончательное решение о качестве продольного профиля построенной дрены принимается после сопоставления проектных и фактических отметок.

Механизированное строительство закрытых горизонтальных дрен производится специализированными звеньями, объединенными в комплексную бригаду. Каждое специализированное звено выполняет определенный

Таблица 12. **Состав комплексно-механизированной дренажной бригады и применяемая техника при сменной производительности 100—200 м**

Вид работ	Оборудование и машины, необходимые для каждого вида работ	Число машин	Обслуживающий персонал		Коэффициент загрузки машин
			специальность	человек	
Разбивка и нивелировка трассы дрены, контроль уровня грунтовой воды, контроль профиля пути дреноукладчика, контроль продольного профиля уложенных труб, маркировка дрены	Нивелир, мерная лента, специальная рейка, ручной бур	—	Дренажный мастер Рабочие	1 2	—
Планировка пути дреноукладчика	Скрепер Д-374	2	Машинист	1	0,75
Погрузка, развозка и раскладка железобетонных колодцев, дренажных и концевых труб по трассе, строительство концевой и устьевой частей дрены, монтаж контрольно-смотровых колодцев	Автокран АК-7,5 Трактор МТС-50 с тележкой	1 1	Крановщик Рабочие Тракторист	1 2 1	0,115
Рытье траншей, отсыпка подстилающего слоя фильтра, укладка дренажных труб, обсыпка труб фильтром, контроль за качеством укладки труб. Засыпка труб.	Дреноукладчик типа Д-301 или ЭД-3,0	1	Машинист Пом. машиниста Оператор	1 1 2	1,00
Отсыпка предохранительного слоя грунта, уплотнение предохранительного слоя грунта					
Подвозка и загрузка фильтра в бункер дреноукладчика	Погрузчик Д-574 Автосамосвал ЗИЛ	1 1	Тракторист Шофер	1 1	0,5 0,5
Засыпка траншеи и выемок грунтом, уплотнение грунта в выемках	Бульдозер Д-271, каток Д-703А	1	Машинист	1	1,00
Подготовка скважины для установки контрольно-смотровых колодцев	Копатель шахтных колодцев КШК-25	1	Машинист Рабочий	1 1	0,117
Итого		10		18	

вид работы. Комплексно-механизированная бригада включает в свой состав рабочих всех специальностей, необходимых для выполнения работ по строительству. Состав бригады и применяемая техника при сменной производительности 100—200 м для работы дреноукладчика типа Д-301 представлены в таблице 12.

Самые высокие показатели коэффициента использования машин в комплекте получаются при одновременной работе двух дреноукладчиков.

В результате анализа эксплуатационных показателей дреноукладчиков было установлено, что коэффициент надежности технологического процесса этих машин равен 0,94. Из-за частых простоев, вызванных необходимостью очистки отсеков бункера и трассы дрены от осыпающего грунта, показатель технологического обслуживания равен 0,95, коэффициент надежности — 0,96. Общий коэффициент использования рабочего времени смены не превышает 0,67.

Для обеспечения нормальной работы дреноукладчиков типа Д-301 в водонасыщенных грунтах применяют способ водопонижения с помощью иглофильтров. При производительности дреноукладчика 11 м/ч работы на участке длиной 54 м продолжаются около 5 ч. Для лучшего использования дреноукладчика длину одного участка водопонижения увеличивают до 108 м. На каждом участке используют по две иглофильтровые установки.

Операции по строительству горизонтального закрытого дренажа с предварительным водопонижением иглофильтрами выполняются в определенной последовательности (табл. 13).

Основное требование к организации строительства закрытого дренажа — поточность производства работ. Поточно-скоростное строительство дренажа должно быть основано на непрерывной повторяемости строительных процессов, включаемых в работу последовательно на различных участках дрены.

Для грунтов, хорошо отдающих воду, Л. П. Тюрин рекомендует за шаг потока принимать одни сутки на участке дрены длиной 110 м (табл. 14). При этом получается наилучшая согласованность ритма двух основных циклов работ в строительном потоке: работы дреноукладчика и водопонижающих установок. Дрена на таком участке укладывается дреноукладчиком за полторы смены.

Таблица 13. **Состав операций и применяемая техника для строительства горизонтального закрытого дренажа в водонасыщенных грунтах**

Последовательность строительных операций	Машина или прибор	Марка машины или прибора
Разбивка и нивелировка трассы	Нивелир, рейка	НТ
Планировка трассы для движения дреноукладчика и установки иглофильтров	Скрепер, бульдозер	Д-458, Д-271, Д-149Б
Контроль качества планировки	Нивелир, рейка	НТ
Разбивка мест установки иглофильтров	Рулетка, рейка	
Нарезка водоотводящей канавы	Канавокопатель	УКП-03, КПУ-200А
Монтаж иглофильтровой установки	Автокран	К-32
Понижение грунтовых вод	Иглофильтры	ЛИУ-2, ЛИУ-3, ЛИУ-5
Укладка горизонтальных закрытых дрен	Дреноукладчики	Д-251, Д-301, Д-659
Защитная засыпка дрены	Бульдозер	Д-271
Монтаж колодцев	Автокран	К-32
Демонтаж иглофильтровой установки	Автокран	К-32
Засыпка траншеи и водоотводящей канавы на полную глубину	Бульдозер	Д-271, Д-149Б
Планировка всего участка	Бульдозер	Д-271, Д-149Б

Таблица 14. **График поточного способа производства дренажных работ** (фронт потока 440 м)

Этапы работ	Календарные дни							Число смен
	1	2	3	4	5	6	7	
Планировка трассы	1	2	3	4	—	—	—	1
Монтаж иглофильтров	—	1	2	3	4	—	—	1
Понижение уровня грунтовых вод	—	1	2	3	4	—	—	2
Укладка дрены	—	—	1	2	3	4	—	1,5
Защитная засыпка дрены	—	—	1	2	3	4	—	1,5
Устройство колодцев	—	—	1	2	3	4	—	1
Разборка иглофильтров	—	—	—	1	2	3	4	1
Полная засыпка траншеи	—	—	—	1	2	3	4	1
Планировка участка работ	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Оборудование: дреноукладчик—1 шт., иглофильтровые установки ЛИУ-2—8 шт. (по две на один участок), автокран К-32—2 шт., бульдозер Д-271—1 шт., скрепер Д-458—1 шт.

Принятый темп работ обеспечивается при использовании 8 комплектов иглофильтровых установок ЛИУ-2 (по два на каждый участок). Водопонижающие работы на одном участке ведутся в течение 3 дней. Требуемое водопонижение достигается на второй день при расстоянии между иглофильтрами 2,25 м.

Время развития потока (отрезок времени с момента начала работ до окончания строительства дрены на первом участке) — 4 дня. Поточная организация работ по данной схеме целесообразна на дренажных системах длиной более 900 м, так как поток занимает 440 м.

Укладываемая дренажная сеть должна обеспечить водоотток, поэтому строительство необходимо начинать от насосной станции или коллектора, чтобы предотвратить обвалы больших масс грунта на уложенную дрену. Окончательно траншею вынутым грунтом засыпают постепенно.

Строительство дренажа должно быть обеспечено материалами и машинами своевременно и без перебоев. Потребное число загрузочных механизмов для беспрерывной работы дреноукладчика можно определить по формуле

$$n = \frac{S v_э T_ц}{Q},$$

где n — число загрузочных механизмов; S — площадь сечения фильтрующей обсыпки, м^2; $v_э$ — эксплуатационная скорость дреноукладчика, м/ч; $T_ц$ — время одного цикла работы загрузочных механизмов, ч; Q — объем фильтрующего материала в одном загрузочном механизме, м^3.

При строительстве дрены полумеханизированным способом разработка грунта траншеи выполняется за два прохода от устья дрены. При первом проходе экскаватор идет по оси траншеи и отрывает ее на 70%, одновременно устраивая временный откос ($m=1$) с бермой шириной не менее 1 м. Грунт выгружается в сторону этого откоса. При втором проходе (поперечная разработка) разрабатывают оставшиеся 30% грунта и устраивают рабочий откос ($m=1{,}5$), который выполняют более тщательно. Со стороны рабочего откоса оставляют строительную берму шириной 5 м для подвозки и складирования труб и фильтрующего материала.

Для укладки дрены на рабочем откосе траншеи вручную отрывают полку. Дно ее должно находиться на вы-

соте 0,3 м от дна траншеи, вырытой экскаватором. Одна из стенок полки срезается с заложением откоса $m=0{,}25$. Вынутый грунт осыпают на дно траншеи и образуют вторую стенку с заложением откоса $m=0{,}5$. Ось полки располагается на расстоянии 1,6 м от оси траншеи. Ее ширина по дну для труб диаметром до 300 мм равна 45 см, а для труб диаметром 300 мм и более — 50 см.

На дно полки с помощью пластмассовой полутрубы диаметром 150—200 м или деревянного лотка отсыпают подстилающий слой фильтра, который разравнивается. Одновременно опускают трубы.

На подготовленном подстилающем слое монтируют дренажную линию, которую засыпают слоем фильтрующей обсыпки, поверх фильтра вручную насыпают и тщательно трамбуют слой грунта высотой 30—50 см.

На строительстве дренажа по методу «полки» бригаде в составе 13—14 человек выделяют 2 бульдозера, 1 кран, 1 самосвал.

Результаты расчетов структуры и оснащенности механизированного отряда для строительства пластмассового дренажа с песчано-гравийным фильтром бестраншейным способом при предварительной точной планировке трасс дрен приведены ниже.

Технические ресурсы: бестраншейный дреноукладчик (1 шт.), дополнительные тягачи для дреноукладки, тракторы ДЭТ-250 (3 шт.), скреперы Д-374А с двухсменным режимом работы (13 шт.), бульдозеры Д-694А с двухсменным режимом работы (5 шт.), экскаватор Э-352А для рытья заходных шурфов (1 шт.), автосамосвалы ЗИЛ-ММЗ-555 для доставки фильтрующего материала (2 шт.), тракторы МТЗ-50 с тележкой для доставки дренажных труб, строительных материалов и конструкций к месту работы (2 шт.), погрузчик Д-574 для погрузки фильтроматериалов (1 шт.), дренопромывочная машина Д-910 (1 шт.).

Трудовые ресурсы: экипаж дреноукладчика (2 чел.), скреперисты (26 чел.), бульдозеристы (10 чел.), трактористы на тягачах ДЭТ-250 (3 чел.), бригада экскаватора Э-352А (2 чел.), шоферы автосамосвалов (2 чел.), трактористы на тракторах МТЗ-50 (2 чел.), машинист погрузчика (1 чел.), бригада рабочих-геодезистов (6 чел.), экипаж дренопромывочной машины (3 чел.), монтажники сооружений (8 чел.), разнорабочие (3 чел.).

Таким образом, для организации поточного строительства дренажа бестраншейным способом необходим механизированный отряд, оснащенный 29-ю машинами и состоящий из 68 рабочих. Сменная производительность этого отряда составит не менее 2000 м, а годовая выработка — 250—300 км закрытого дренажа.

При решении многих практических вопросов по организации и механизации строительных работ большое значение имеет установление расчетных значений эксплуатационных параметров работы машин. В зависимости от характера решаемых вопросов за расчетные значения показателей принимают данные соответствующих нормативных материалов (СНиП, ЕРЕР, ЕНиР, Ценник № 1, 2, 3 и др.) с учетом передового опыта организации работ.

Приведенные в таблице 15 данные могут быть использованы для предварительных расчетов при составлении планов организации строительства горизонтального дренажа в южных районах страны. В основу приведенных показателей положены средние значения действующих норм выработки и результаты анализа фактического состояния использования техники строительными организациями Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР.

Засыпка дренажных линий по стоимости и трудоемкости имеет в общих затратах на строительство дренажа незначительный вес, но последующая надежность рабо-

Таблица 15. **Эксплуатационные показатели основных машин, применяемых при строительстве дренажа**

Машины	Число рабочих дней в году	Сменность	Выработка в год		Эксплуатационная производительность, ед. изм/смены	Расход горючего, кг	
			единица измерения	количество		на 1000 единиц измерения	на 1000 м дрен
Дреноукладчики:							
Д-301, ЭД-3,0	150	1,0	км	28—35	1,2	350	350
Д-659А, Д-659Б	150	1,0	км	18—25	0,1	500	500
БДМ-301	150	1,0	км	300	2,0	280	280
Экскаваторы с вместимостью ковша более 0,35 м³	225	1,6	тыс. м³	200	0,55	200	4100
Скрепер	205	1,25	тыс. м³	10	0,039	230	940
Бульдозер	220	1,3	тыс. м³	180	0,630	120	580

ты дренажа во многом зависит от нее. При засыпке нужно следить, чтобы не было повреждений дренажных труб и деформации линии дрены, чтобы вода беспрепятственно поступала в дрену. Нельзя засыпать траншеи мерзлым грунтом. Засыпанные траншеи не должны мешать нормальному использованию земель.

Обычно дрены засыпают в два приема. Раздельная засыпка траншей позволяет лучше контролировать качество работ и исправлять допущенные ошибки. Обратная засыпка траншеи производится до уровня дна корыта поперечными или косыми ходами бульдозера. Чтобы не нарушить фильтровую обсыпку и трубы, фильтр надо покрыть предохранительным слоем грунта толщиной 0,15 м, который отсыпается вслед за проходом дреноукладчика.

Грунт обратной засыпки до последнего времени не уплотняли. В настоящее время эта операция считается необходимой. В этом случае перспективным может быть способ замочки. Уплотнение обратной засыпки комбинированной замочкой проводится в зависимости от длины дрены в один или несколько приемов. Замочка дрены осуществляется на всей протяженности одновременно, если длина ее не превышает 500 м. В противном случае дрена разбивается на два и более самостоятельных отрезка. Границами между отрезками служат смотровые колодцы.

На замочку 1 м траншеи шириной 0,6 м и глубиной 3 м в зависимости от влажности грунта требуется 3 $м^3$ и более воды. Замочку проводит бригада из трех человек: бригадир, моторист и рабочий.

Степень уплотнения грунта в результате замочки устанавливается путем сравнения средней плотности засыпки и грунта естественного залегания. Достигнутая плотность считается удовлетворительной, если средняя плотность засыпки не меньше средней плотности грунта в стенках траншеи.

К числу основных сооружений, возводимых на дренажной сети, можно отнести начальные и промежуточные (смотровые) железобетонные колодцы сборной конструкции.

Железобетонные кольца устанавливают на цементном растворе, а стык снаружи заклеивают полосой мешковины шириной 15 см, пропитанной горячим битумом, в два слоя.

Верх колодца должен выступать над поверхностью земли не более чем на 0,5 м и закрываться крышкой-сеткой.

Все бетонные поверхности дважды подвергают гидроизоляции раствором битума на бензине.

Для проверки качества строительства дренажа осуществляется контроль выполненных работ. Он может быть текущим и последующим (после окончания работ), сплошным и выборочным, визуальным, приборным и автоматизированным, пассивным и активным.

Во время строительства закрытого дренажа желательно иметь не только текущий контроль, но и возможность судить впоследствии о состоянии дрены, в каких местах могут возникнуть неисправности. Результаты текущего контроля технологического процесса можно использовать потом как паспорт дрены, а контроля готовой дрены — как последующий контроль.

ГЛАВА 6

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ

Эксплуатационная надежность системы дренажа

Надежность и долговременность работы дренажа зависят от типа дренажа (открытый или закрытый), от проектных решений, конструктивного исполнения и четкости системы эксплуатации.

Удовлетворительной работой системы дренажа следует признать такую, которая при постоянной эксплуатации с комплексом необходимых профилактических ремонтов обеспечивает регулирование водно-воздушного и водно-солевого режимов в заданных пределах на площади, обслуживаемой этой системой.

Рассмотрим систему: почвогрунт — дренаж — коллектор — водоприемник с точки зрения надежности ее компонентов, проанализировав возможные изменения каждого из них (рис. 39).

Пользуясь методикой и принципами, изложенными Ц. Е. Мирцхулавой и С. Ш. Зюбенко относительно лотковых каналов, разделим возможные отказы на устранимые и неустранимые. Рассмотрим причины, вызывающие их, и меры по их устранению.

Почвогрунты зоны аэрации следует рассматривать в тесной увязке с элементами дренажной системы и в динамике их развития.

В процессе дренирования обычно происходит растворение солей и вымыв их в дренаж. В связи с этим пористость грунтов и их фильтрационные свойства увеличиваются. Например, в совхозе № 4 Голодной степи, где исходное содержание гипсов превышало 16—28%, по мере их выщелачивания на фоне дренажа образовались крупные поры и сквозные ходы, аналогичные ходам землероев. В результате этого резко увеличивались коэффициенты фильтрации.

Следует отметить, что коэффициент фильтрации на фоне открытого дренажа увеличивается и стабилизируется быстрее. Затем наблюдается обратный процесс —

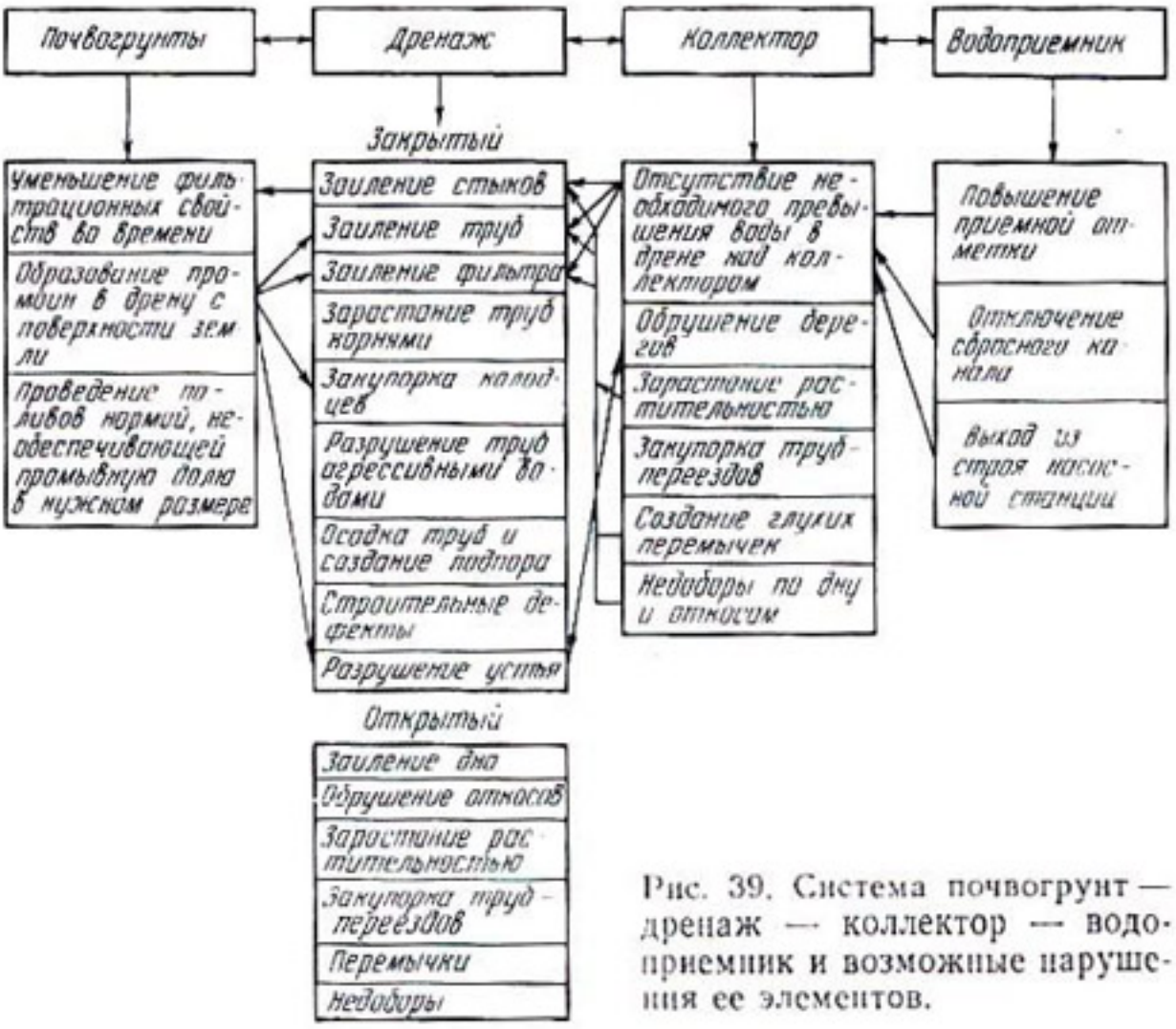


Рис. 39. Система почвогрунт — дренаж — коллектор — водоприемник и возможные нарушения ее элементов.

уменьшение $K_ф$. Причем на фоне горизонтального закрытого дренажа это происходит быстрее, очевидно потому, что под влиянием фильтра начинается процесс стабилизации и формирования грунта обратной засыпки и медленного заиления образовавшихся пор как ирригационными наносами, так и переформировавшимися в процессе поливов частицами верхних слоев почвогрунтов.

Для закрытых дрен, защищенных хорошо построенными фильтровыми обсыпками, эти деформации не представляют опасности, так как они быстро стабилизируются и по сути увеличивают по сравнению с первоначальными исходные расходы воды в дрене. Эти изменения следует отнести к периоду стабилизации начального этапа работы дренажа.

В то же время имеются изменения и другого характера, специфические для лёссовых просадочных и других уплотняющихся грунтов — снижение коэффициента фильтрации под влиянием орошения и увлажнения массива. По наблюдениям автора, в Голодной степи это

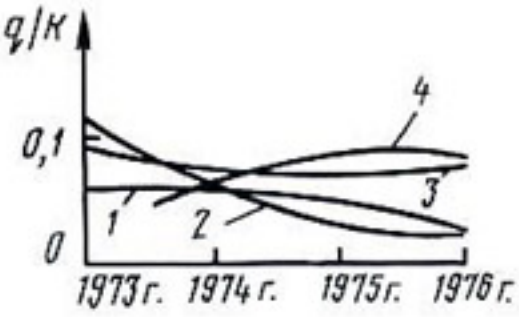


Рис. 40. Изменение дренажного модуля во времени для дрен, уложенных бестраншейным дреноукладчиком с различными фильтрами:

1 — капроновая ткань (нож самоуравновешивающейся формы); *2* — капроновая ткань (трехступенчатый нож); *3* — песок с капроновой тканью; *4* — песчаная обсыпка.

изменение достигает 15—20% и должно учитываться в первоначальных расчетах дренажа в процессе проектирования на перспективу.

Одновременно нельзя забывать, что устойчивость системы почвогрунт — дренаж — коллектор — водоприемник в основном зависит от правильности подбора и выполнения фильтра. С этой точки зрения характерны результаты исследований, проведенных В. И. Батовым под руководством В. А. Духовного в совхозе № 7 Голодной степи, по выявлению изменений потерь напора в придренной зоне бестраншейного дренажа различного конструктивного исполнения. За показатель изменения фильтрационных свойств взята динамика показателей $Q/K=f(t)$, приведенная к напору 0,5 м. Результаты исследования (рис. 40) позволили установить следующее:

при фильтре из песчаного материала, соответствующего расчетным соотношениям d_{50}/D_{50} и коэффициенту неоднородности, наблюдается в первый год некоторое увеличение значений Q/K благодаря улучшению фильтрационных свойств фильтра в результате самопромывки пылеватых частиц, содержание которых в фильтре составляло 8—12%. После этого кривая стабилизируется;

при фильтре из капроновой ткани, так же как и из других синтетических материалов, вымывающиеся из фильтра и грунта придренной зоны частицы не могут проникнуть сквозь ткань и снижают фильтрационную способность дренажа. Кроме того, характер изменения прочностных свойств стекловолокнистых фильтров не позволяет гарантировать их долговечность. Вскрытие образцов стекломатов и стекловаты, заложенных в совхозе № 6 Голодной степи, после 4 лет работы показало, что в условиях минерализованных вод они приобретают хрупкость и рассыпаются. Г. Я. Сегаль и Э. Х. Эгли установили резкое изменение прочности клееных, комбинированных и иглопробивных фильтрующих материалов под действием приложенной нагрузки.

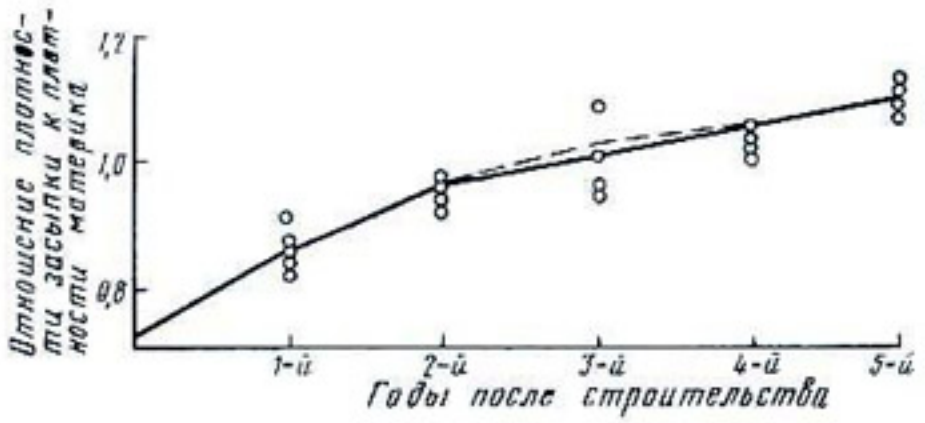


Рис. 41. Самоуплотнение обратной засыпки дренажа в процессе орошения прилегающих к дрене земель в одном из совхозов Голодной степи.

Образование промоин в дрену проявляется обычно в начальный период эксплуатации. Характерно оно только для траншейной и полумеханизированной технологии строительства дренажа, ибо при узкотраншейном (щелевом) и бестраншейном способах плотность грунта под дреной превышает естественную.

При траншейном способе в сухих грунтах плотность обратной засыпки обычно намного меньше, чем в материке. Поэтому вода при поливах, прорываясь в наддренную полосу, промывает рыхлый грунт засыпки и зачастую нарушает не только ее, но и фильтр трубы, размывая одновременно устье. Уплотнить рыхлый грунт в траншее, как это делается в насыпях обычно малыми катками либо ударным уплотнением (конструкции механизмов для этого были предложены ГСКБ по ирригации), в процессе строительства невозможно из-за отсутствия воды на вновь орошаемых землях, где применяется этот метод.

В настоящее время для предупреждения этих деформаций наиболее широко распространен следующий метод. Вдоль дрены в течение первых трех лет ее эксплуатации оставляют незасеваемую защитную полосу шириной 3—5 м. Ее ограждают с двух сторон перехватывающими канавами, не допускающими попадания воды в дрену. Эта полоса ежегодно подсыпается и планируется. По мере орошения под действием растекания фильтрационных вод от полива происходит увлажнение и самоуплотнение обратной засыпки (рис. 41).

Этот метод имеет два недостатка: первый — на наддренной полосе зачастую образуется свод из уплотненно-

го грунта, что грозит провалами и может вызвать несчастные случаи, второй—сама полоса 3 года не засевается и не используется в сельскохозяйственном обороте. Поэтому идут настойчивые поиски методов уплотнения обратной засыпки. Один из таких методов — замочка наддренной полосы, которая проводится при пуске поливной воды на поля или специальными попусками воды из канала. Имеется несколько разновидностей замочки: «сверху», «снизу» и комбинированная.

Последний наиболее положительный в целом метод требует очень тщательного надзора бригады и регулирования воды, так как при падении уровня воды в дрене возможен ее замыв.

В США, как указывает Л. Вилардсон, для уплотнения обратной засыпки дренажа, построенного траншейным способом, применяется наряду с замочкой «сверху» — затоплением — полив дождеванием при закрытом устье. После замочки дрену обязательно промывают под напором 70 м расходом 3,5—4 л/с.

В настоящее время предложен и испытывается в САНИИРИ (А. Адылов) новый метод. Он состоит в том, что полуметровый слой грунта над фильтром в процессе засыпки обрабатывают раствором полимера К-4. В результате этого грунт приобретает способность противостоять размыву даже при больших высотах свободного падения воды.

В период стабилизации работы дренажа промоины могут возникать и при полумеханизированном способе строительства дренажа. Но здесь они имеют другой характер и причину: вследствие разницы в толщине уплотненного слоя при обратной засыпке в течение одного сезона возникают продольные усадочные трещины. Их следует перепахать и отгрейдеровать. После этого над дреной можно вести полевые работы и полив.

Недостаточность промывной доли в процессе работы дренажа опасна при длительном характере этого явления. Обычно для систем с оптимальным мелиоративным режимом встречающиеся в гидрографе стока рек двух-трехлетние, даже катастрофические, маловодья не опасны, так как интенсивность соленакопления на таких системах невелика. Примером может быть новая зона Голодной степи, где в 1974—1975 гг. в результате маловодья на Сырдарье было получено на гектар нетто в годовом разрезе 5,5 тыс. м^3 воды, что ниже дефицита оро-

сительной воды. Здесь, по данным мелиоративной службы Голодностепстроя, запасы солей в зоне аэрации увеличились незначительно — на 5—12 т/га.

Закрытые дрены в целом достаточно надежные и долговечные сооружения, не требующие больших затрат на их эксплуатацию. По данным автора, стоимость эксплуатации закрытого горизонтального дренажа в Голодной степи составляет всего 6,5—10,5 руб/га (табл. 16).

Таблица 16. **Сравнительные стоимости эксплуатации дренажа, руб/га**

Затраты	Открытый горизонтальный дренаж	Закрытый горизонтальный дренаж	Вертикальный дренаж
Амортизация	7,5—10	4,2—7	6,0—18,0
Ремонт и поддержание	6—9	2—3	20—40
Содержание эксплуатационного штата	1,5—2	0,3—0,5	2—3
Итого	15—21	6,5—10,5	28—61

Следует отметить, что таблица составлена по осредненным данным эксплуатации дренажа первого периода строительства несовершенной конструкции. Совершенствование конструкций дренажа еще более повысило его надежность и снизило стоимость эксплуатации.

Заиление стыков частицами грунта и фильтра — явление крайне нежелательное. В практике Голодной степи заиление стыков наблюдалось только при применении керамических труб с превышением наружного диаметра над внутренним более чем на 15 мм.

Ширина стыка и размер перфорации устанавливаются таким образом, чтобы создать свод над стыками или предотвратить возможное движение связных частиц грунта. С. К. Абрамов рекомендует принимать размер щели $\leqslant 1{,}25\, d_{60}$, а размер круглых отверстий $\leqslant 1{,}8\, d_{50}$, но не более 1,0—1,5 мм. Однако эта величина справедлива только для гладкого стыка труб и круглой перфорации, но непригодна для труб с раструбами и фасками, так как здесь частицы в трубу не просыпаются, а отслаиваются гидродинамическим действием потока при входе в трубу и вмываются в виде пульпы. В связи с этим ширина щелей или диаметры перфораций и стыка могут быть уве-

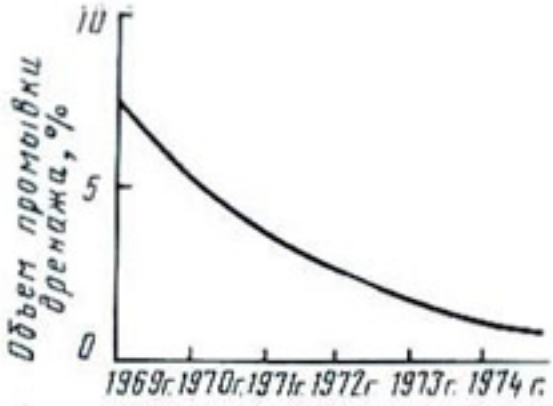


Рис. 42. Зависимость объемов промывки дренажа от времени эксплуатации.

личены до 3 d_{50}. Если учесть, что в горизонтальном дренаже на орошаемых землях для обеспечения необходимой водоприемной способности обязательно применяют фильтры со средней крупностью ячеек 1—2 мм, то оптимальный размер **стыков,** при которых закупорка не происходит, — 2—3 мм.

Заиление труб может возникнуть как следствие образования промоин в дрену, нарушения стыков из-за осадки, подпора дрен, засорения колодцев и др. Основная защита от заиления — фильтровая обсыпка дренажа. Однако в начальный период работы дренажа, после строительства, пока не уплотнилась обратная засыпка, не устранены дефекты в колодцах, не вынеслись пылеватые частицы из фильтра, заиление имеет наибольшее распространение, при этом в дренах можно обнаружить слоистые осадки илистых отложений. В. М. Зубец считает, что в зоне осушения эти явления заканчиваются в течение 5—6 ч после пуска дрены. В Голодной степи они длятся около года, а иногда и более. Это наглядно видно из зависимости, полученной автором совместно с Н. С. Козубом (рис. 42).

Наилучшие условия борьбы с заилением создаются тогда, когда в дрене за счет уклонов возникают саморазмывающие скорости, то есть, как указывает И. Ржига, вертикальная скорость пульсации больше гидравлической крупности наносов. По расчетам И. Ржиги, эта скорость обеспечивается при следующих уклонах дрен. $D=50$—65 мм; $i\geqslant 0{,}05$; $D=65$—100 мм; $i\geqslant 0{,}04$; $D=120$—150 мм; $i\geqslant 0{,}35$.

Данные, полученные И. Ржигой, бесспорно завышены. Более точная зависимость установлена М. Х. Амером на основе анализа заиления дрен в дельтовых зонах АРЕ:

$$\frac{v_s}{D}=0{,}00049\cdot 10^{0{,}07}\frac{C}{\sqrt{s}}-0{,}075, \qquad (217)$$

$$C=\frac{Q}{D^{2{,}5}\sqrt{g(\gamma_s\gamma_w)/\gamma_w}}, \qquad (218)$$

где v_s — средняя глубина в дрене; D — диаметр трубы; C — гидравлический коэффициент; s — уклон; γ_s и γ_w — плотность наносов и воды; $\gamma_w = 1$.

Из этого выражения И. Ржига определил оптимальные уклоны дрен: 0,0025—0,003.

По наблюдениям авторов, интенсивность заиления также зависит от уклонов дренажа. При уклонах более 0,003 дренаж практически не заиляется. Характерен в этом отношении пример работы дренажа в Яван-Обикиикской долине. Здесь уклоны превышают 0,003. За все время эксплуатации с 1966 г. дрены ни разу не промывались, однако на 1/I 1976 г. из них 98,3% находятся в рабочем состоянии. Единственные факты разрушения дренажа связаны с разрушением колодцев и их засорением.

Заиление дренажа устранимо. В этом случае, если заилена не вся полость дрены, заиление успешно ликвидируется промывочной машиной ПДТ-125 конструкции ГСКБ по ирригации Главсредазирсовхозстроя. Эта машина сконструирована специально для дренажа орошаемых земель и работает по принципу гидравлического действия струи. При этом реактивная головка, вводимая в трубу, имеет одно отверстие размывающее и три-четыре реактивных для продвижения головки по трубе. Машина ПДТ-125 по сравнению с машиной Д-910, работающей в зоне осушения, имеет более мощное насосное оборудование и бо́льший диаметр головки. Техническая производительность одной машины — 40 км в год. Если дрена заилена полным сечением, использование ПДТ-125 малопроизводительно, так как приходится неоднократно вводить и выводить головку.

За рубежом применяются и другие способы очистки дрен от заиления наносами. Так, в США для механической очистки дрен от заиления применяется микробур с электродвигателем. При намечающемся заилении с начального колодца дрены в нее запускается ребристый мячик, который под действием тока воды проталкивается к устью. Для больших диаметров дрен и коллекторов применяют тросопротягивающие устройства со щетками, тросопротягивающие устройства с вращающейся вокруг своей оси головкой с приводом от специального двигателя, на которой, кроме гидравлических струйных аппаратов, расположены скребки и эластичные щетки.

В СССР аналогичные способы предложены А. С. Волеговым, Б. П. Белениновым. Так, устройство, предло-

женное Б. П. Белениновым, представляет собой шар, наполненный жидкостью под давлением, на котором равномерно расположены скребки в виде кольцеобразных пересекающихся ребер, образующих сетку с квадратными ячейками. Шар такого типа пропускается по дрене сверху вниз.

Заиление фильтра возможно только при неправильно подобранном составе фильтровой обсыпки и при образовании промоин. Следует отметить, что если фильтр подобран в соответствии с положениями, указанными в главе 4, то в процессе работы дрены он самоочищается. Примером могут служить результаты исследований илансайского песка, проведенных в лаборатории строительных материалов Голодностепстроя на фильтрационном лотке размером 1×1, 6×2,5 м. Во время 22-дневной работы под напором 0,5 м количество пылеватых частиц в фильтре уменьшилось с 8,9 до 1,6%, состав фильтра соответствовал соотношениям D_{60}/D_{10} и D_{50}/d_{50}, рекомендованным методиками подбора. При качественном строительстве и проектировании заиление фильтра исключается. После перевода дренажа в новой зоне Голодной степи на оптимальный состав фильтра из илансайского песка при ремонтах дренажа и восстановлении вышедших из строя дрен не было обнаружено случаев заиления фильтра. В то же время при применении в 1960—1961 гг. однородного материала с большой крупностью фракций ($D_{50}/d_{50} > 60 \div 105$) повсеместно обнаруживались факты превращения фильтра в смесь ила, глины и гравия, подобную глинобетону. Этот дефект в процессе эксплуатационных мероприятий пока не устраняется.

Зарастание труб корнями наносит существенный вред дренажу, забивая полость его почти наглухо. Случаи зарастания корнями деревьев были обнаружены при вскрытии дренажа на Золотоордынской опытно-мелиоративной станции. В новой зоне Голодной степи в 1966 г. в совхозе № 5, а затем в совхозе «Фархад» при обследовании причин заиления дренажа было установлено, что мочалистые корни тысячецветника (многолетний сорняк, произрастающий на необработанной площади) достигают дренажных труб на глубине 3 м и, проникая в них через стык шириной более 5 мм, плотно забивают всю дрену. Удалить эти корни механическим способом невозможно. Институтом защиты растений АН УзССР испытан гербицид — смесь монурона с далапоном. Ее вносят через ко-

лодец в дрену. Через 15 дней она разрушает корень. Следовательно, этот дефект можно устранить.

Закупорка колодцев вызывается либо дефектами при строительстве (плохо заделанные швы, нарушенные сопряжения колодца с трубой дрены), либо вследствие засорения их бытовыми отбросами, что особенно часто встречается в населенных пунктах или около них. Колодцы пока очищаются немеханизированными средствами, так как объемы работ небольшие и легко выполняются вручную.

Дренажные трубы разрушаются также под действием агрессивных вод. С. К. Абрамов и другие отмечают, что коррозионная устойчивость труб различна и зависит от характера минерализации грунтовых вод. Наиболее агрессивны растворы углекислот, сульфатов и хлоридов, особенно при кислой среде. С. М. Толчков отмечает факты разрушения гончарных труб вследствие кристаллизации солей. Однако основная причина — низкое качество труб, изготовленных в начальный пусконаладочный этап работы Янгиерского завода дренажных труб. Извлеченные образцы гончарных труб, пролежавших более 50 лет на Центральной опытно-мелиоративной станции, 55 лет на Байрамалийском опытном поле и 18 лет в Голодной степи при минерализациях стока дренажа от 4 до 30 г/л имели плотность 50—85% первоначальной.

Более низкой устойчивостью во времени обладают бетонные трубы. М. П. Фейгин исследовал прочность таких труб, уложенных на Муганской опытной станции, через 30 лет после их работы. Трубы находились в воде с общей минерализацией 20—40 г/л, в том числе Cl^- около 60%, SO_4^{--} менее 10%. При этом прочность их снизилась на 30—45%. Отсюда можно предположить, что срок службы бетонных труб составит $\approx$50—70 лет.

Вопрос устойчивости во времени в условиях агрессивной среды полиэтиленовых и полихлорвиниловых труб изучен недостаточно. Подробный разбор долговечности этих труб во времени, проведенный А. И. Мурашко вне зависимости от минерализации воды, показывает, что основные деформации при нагрузках, соответствующих имеющимся в дренаже, происходят в первые 4—5 месяцев работы и не превышают допустимых пределов. В то же время данные Всесоюзного научно-исследовательского института новых строительных материалов (ВНИИНСМ) дают основания считать, что прочностные

свойства полиэтилена и полихлорвинила в минерализованных водах не ухудшаются. Исходя из этого, можно предположить достаточно длительный срок службы этих труб — более 100 лет, тем более, что основной фактор деформации этих труб — высокие температуры — в оросительном дренаже отсутствует. Температура в нем постоянно поддерживается на уровне 14—18°С.

Осадка труб и появившиеся в результате этого подпоры наблюдаются только при нарушении правил укладки дренажа, то есть когда трубы укладывают методом «полки» на разжиженное или неосушенное основание или на подсыпной грунт. Исследованиями в Голодной степи установлено, что в остальных случаях осадка труб даже на просадочных грунтах при глубоких грунтовых водах на глубине 2,8—3 м происходит достаточно равномерно. Относительная неравномерность осадки не превышает 2 см, что не может существенно ухудшить работу дренажа.

Строительные дефекты часто выводят из строя дренаж, особенно в период стабилизации его работы. Борьбу с этими дефектами следует вести путем повышения технического уровня производства работ, усиления контроля при приемке дренажа в эксплуатацию, совершенствования технологии процессов, их механизации и обеспечения надежности строительства.

Разрушение устья может происходить в результате образования промоин в дрену с поверхности земли и вследствие подмыва русла коллектора или дреносборителя, а также при очистке коллекторов. Этот легко восстанавливаемый дефект в то же время должен быть исключен надежной конструкцией самого устьевого сооружения и правильным проектированием водоприемника по отношению к дрене.

Нарушения нормальной работы открытых дрен и коллекторов, как видно из их сопоставления, совпадают. Поэтому будем рассматривать дефекты коллекторов, в то же время останавливаясь, где это нужно, на особенностях открытых дрен.

Заиление дна и обрушение берегов, вызывающих подпор воды, — самые распространенные и тесно связанные между собой дефекты.

Заиление дна на одних участках и разрушение откосов на других происходит под влиянием ряда причин:

неоднородности грунтов по разрезу и длине коллек-

тора, в результате чего на определенных участках под влиянием гидродинамических сил фильтрации происходит вымыв частиц из отдельных слоев и их оплывание; подмыв откосов приводит к ускоренному их обрушению и усилению заиления;

неоднородности грунтов и переломов в уклонах, которые способствуют возникновению размывающих скоростей на одних участках и заиляющих на других, в результате чего процессы размыва и заиления периодически сменяются;

сброса оросительных вод в коллекторе при бесконтрольном поливе;

промоин в дренах, образовавшихся в начальный период эксплуатации.

Эксплуатация открытых коллекторов в услових орошения (табл. 17) показывает, что только в условиях средних и тяжелых суглинков, а также глин открытые коллекторы могут работать более или менее надежно. При этом, даже для этих грунтов и при соблюдении сроков очистки коллекторов, минимальные колебания уровня воды от очистки до очистки составляют 40—50 см. Поэтому устья надо закладывать выше расчетного уровня воды на 60—80 см.

Для открытых дрен интенсивность заиления не установлена, но следует предполагать, что она будет по край-

Таблица 17. **Удельные показатели устойчивости работы открытых коллекторов в условиях орошения**

Показатели	Грунты				
	плывуны и пылеватые пески	легкие супеси	средние суглинки	тяжелые суглинки	глины
Изменение отметок дна в течение одного года, м	0,6—1,0	0,3—0,6	0,2—0,35	0—0,1	0—0,1
Коэффициент заложения откосов дрен и коллекторов	2,5—3,0	2—2,5	1,5—2,0	1,0—1,5	0,75—1,0
Объем ежегодного заиления, $м^3/м$	1,5—3,6	0,5—1,5	0,25—0,55	0,15—0,25	0,12
Периодичность очистки	Ежегодно	1 раз в 1—2 года	1 раз в 3 года	1 раз в 4—5 лет	1 раз в 5—7 лет
Продолжительность надежной работы	3—4 месяца	6 месяцев—1 год	2 года	3—4 года	4—6 лет

ней мере в 2 раза больше, чем в открытых коллекторах. Так, в Узбекистане эксплуатируется 60 тыс. км открытых дрен и коллекторов, в том числе 16 тыс. км межхозяйственных коллекторов. Общий объем очистки составляет 66—75 млн. м³ в год, или в среднем 1,2 м³/м. В то же время, по данным Главного управления мелиорации Минводхоза УзССР, более 32% дрен находится в неудовлетворительном состоянии.

Поэтому необходимо отказаться вообще от открытых дрен, а открытые внутрихозяйственные коллекторы выполнять только в однородных устойчивых средних суглинках и в более тяжелых грунтах.

Зарастание растительностью проявляется при минерализации воды в коллекторах менее 8—10 г/л, при большей минерализации не могут расти даже тростник и камыш. По мере опреснения грунтовых вод зарастание коллекторов увеличивается, однако при скоростях воды более 0,5 м/с растительность развивается слабо. Зарастание открытых коллекторов снижает скорость воды в них в 2—3 раза, усиливает интенсивность заиления и уменьшает работоспособность коллекторов.

Коллекторы от растительности и одновременно от заиления очищают в основном экскаваторами. Многочисленные разработки, выполненные САНИИРИ по механическому удалению водорослей, ГрузНИИГиМ по сжиганию, оказались неэффективными для таких растений, как камыш, водоросли, актинии и др. Хорошие результаты на коллекторах новой зоны Голодной степи и Туркмении получены при биологическом уничтожении водорослей (при слое воды более 35—40 см) рыбами-мелиорантами — белый амур и толстолобик. Эта мера может быть рекомендована для крупных межхозяйственных коллекторов.

Для более мелких коллекторов и открытых дрен надо искать другие решения. При этом надо учитывать, что растительность на открытых коллекторах выше максимального уровня грунтовых вод играет положительную роль в укреплении откосов и предотвращении их оплывания. Поэтому должна быть разработана такая технология очистки, при которой растительность будет уничтожаться только ниже уровня воды в коллекторе.

Закупорка труб-переездов на коллекторах и открытых дренах связана в основном с процессами заиления и уси-

ливается при неправильной методике проектирования. Согласно этой методике, в 1950—1960 гг. трубы на коллекторах укладывали под расчетный уровень воды, чтобы погасить энергию потока. Если учесть колебания дна в коллекторе, то трубы надо укладывать на одной отметке с проектным дном коллектора, при этом от очистки до очистки будет соблюдаться его нормальная работа. Размывов же нижнего бьефа в коллекторах не будет, так как расходы воды в них малы.

В то же время там, где разница между допустимыми уровнями в коллекторе и нормальными менее 30 см, а также в плывунных, легких и оплывающих грунтах необходимо строить не трубы-переезды, а мосты на сваях. Очистка труб — довольно трудоемкое мероприятие и пока еще не механизировано.

Создание глухих перемычек недопустимо на коллекторах. Служба эксплуатации должна не допускать их устройства. Глухие перемычки не только ликвидируют водоотток с дренируемой территории, но и при последующих сбросах воды (ликвидации перемычек) повышают градиенты напора, увеличивая тем самым объем заиления и обрушения в них.

Недоборы по дну и откосам также недопустимы, как и строительные дефекты в закрытом дренаже. Поэтому методы предотвращения и контроля здесь те же.

Нарушения, которые могут возникнуть в водоприемнике, например повышение приемной отметки, необходимо предотвращать, а на случай возможного возникновения их устанавливать насосную станцию временного типа для обеспечения оттока.

Эти легко устранимые нарушения при правильно запроектированной системе самотечного сброса можно избежать вообще.

На основе анализа данных эксплуатации коллекторно-дренажной сети новой зоны Голодной степи автором оценена работоспособность системы почвогрунт — дренаж — коллектор — водоприемник. Выход из строя закрытых дрен в первые два года составил 7%, а в последующие годы — 5% в год. В качестве методического аналога были использованы рекомендации Ц. Е. Мирцхулавы и его проработки для лотковой сети. Система при этом рассматривалась как последовательная для открытых дрен и с параллельным резервированием и восстанавливаемостью для закрытых. В результате ве-

роятность безотказной работы такой системы составила:

при открытых дренах:
в оплывающих грунтах 0,49
в суглинках 0,63
при закрытых дренах:
в первые два года 0,96
в последующие годы 0,97

Организация эксплуатационной службы дренажа

Для обеспечения нормальной и длительной работы дренажа очень важна правильная организация ремонтной и эксплуатационной служб и оснащение их необходимыми механизмами.

Мелиоративные службы в системе минводхозов республик формируются обычно в виде управлений мелиоративной службы (УМС) в составе областных управлений оросительных систем (ОблУОС). В соответствии с существующим положением о службе мелиорации на них возлагаются:

организация систематических наблюдений за уровнями и минерализацией грунтовых вод, за расходами и минерализацией дренажного стока на границах хозяйств, за динамикой засоления активной зоны почвогрунтов;

контроль за состоянием межхозяйственной и внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети, обеспечение постоянной работоспособности межхозяйственной сети;

составление планов работ по очистке внутрихозяйственной и технологическому обслуживанию коллекторно-дренажной сети, составление проектов и контроль за их выполнением специализированными ремонтно-строительными организациями;

контроль за выполнением хозяйствами всех правил содержания внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети;

составление планов и контроль за осуществлением промывных поливов.

В составе УМС создаются лаборатории по выполнению химических анализов вод и почвогрунтов, служба надзора, осуществляющая контроль за наблюдательными скважинами и пьезометрической сетью на дренах и коллекторах. При ОблУОСах (или трестах при них) имеются ремонтно-эксплуатационные ПМК или СМУ по

очистке и ремонту коллекторно-дренажной сети, оснащенные необходимыми механизмами и техникой.

Для систематических наблюдений на дренированных землях устраиваются наблюдательные скважины (одна скважина на 100—200 га). Обычно поверхность грунтовых вод на орошаемой территории отличается большой неоднородностью по залеганию от поверхности земли. Поэтому для наблюдений за площадями очень важно правильно организовать размещение наблюдательных скважин. Скважины вблизи дрены будут показывать заниженный уровень грунтовых вод относительно среднего, а у оросителя или посредине междренья — завышенный. Поэтому, располагая на поливной карте в среднем одну скважину, следует размещать ее от дрены на расстоянии $^3/_5$ половины междренья, а уровень замерять в среднем через 5—8 дней после прекращения полива. Конструкция наблюдательной скважины должна обеспечивать быстрое изменение уровня воды в ней при изменении уровня грунтовых вод, сохранность скважины при механизированных работах на поле, исключать попадание в нее оросительных вод и осадков. Для этого в верхней части скважины устраивают глиняный или цементный замок. Скважина обсаживается кольцом диаметром 60—100 см. Фильтр на скважине устанавливается во всем диапазоне возможных изменений уровня грунтовых вод (рис. 43).

Для воднобалансовых наблюдений и определения эффективности работы той или иной конструкции дрен устраивают специальные воднобалансовые участки площадью 8—25 га, оборудуемые средствами наблюдения за водоподачей, приборами для контроля испарения и транспирации, например приборы АФИ, а также устраивают сеть наблюдательных и пьезометрических скважин.

Наблюдения за уровнем грунтовых вод ведутся один раз в десять дней, за минерализацией — один раз в квартал. Кроме того, на выбранных по гидрогеологическим параметрам типовых участках устраивают кусты пьезометрических скважин для определения характера водообмена между почвенными и грунтовыми водами, наличия напорного питания грунтовых вод, глубокозалегающих водоносных горизонтов. В совхозах и колхозах также имеется мелиоративная служба в составе главного мелиоратора, старшего мелиоратора, инженера гидрометра, техников мелиоративных участков.

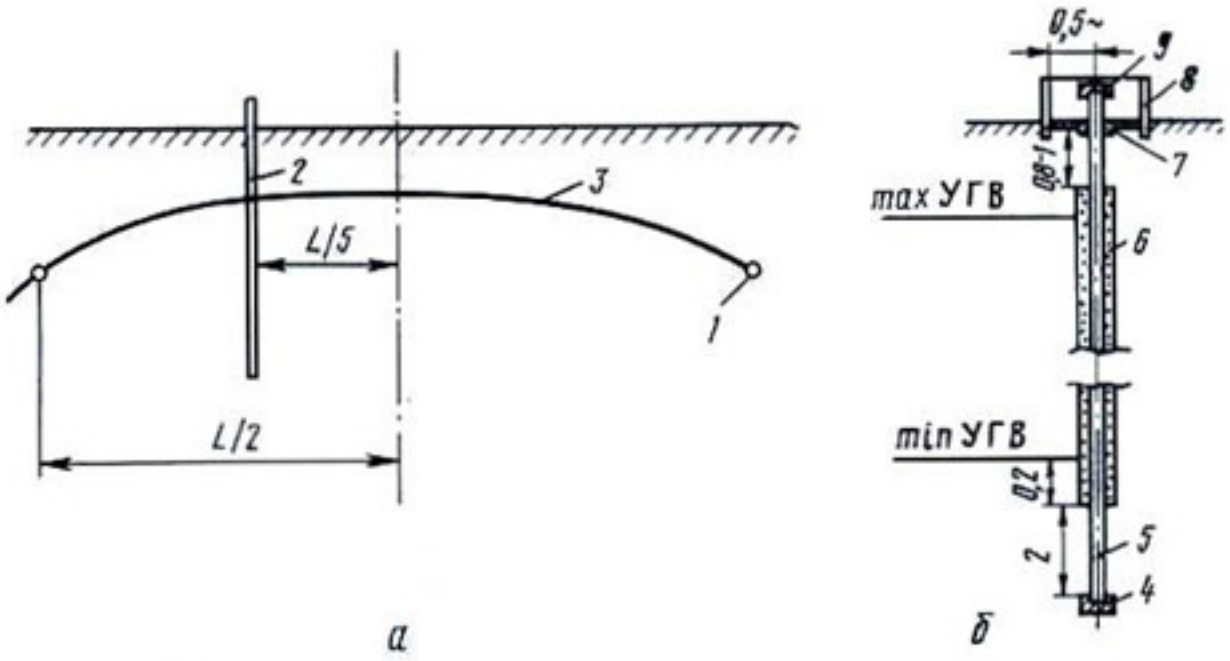


Рис. 43. Наблюдательная скважина горизонтального дренажа:
а — схема размещения; *б* — конструкция скважины; *1* — дрена; *2* — скважина; *3* — депрессионная кривая; *4* — пробка; *5* — отстойник; *6* — фильтр; *7* — глиняный замок; *8* — колодец; *9* — оголовок. (Размеры в м.)

В среднем инженерно-технический работник руководит мелиоративными наблюдениями на площади около 1000 га внутри хозяйств. В их распоряжении имеются бригады, которые в определенные периоды — перед промывками и поливами — могут быть усилены за счет привлечения рабочих и сельхозбригад для выполнения таких работ, как очистка колодцев, ремонт устьев, запашка наддренных полос и др. Один раз в год, обычно осенью, после уборки урожая, проводится инвентаризация всех коллекторов и дренажа и составляются планы ремонтных и профилактических работ.

Состояние открытых дрен и коллекторов оценивается на основе визуального осмотра (определение наличия перемычек, обрушений, подпоров) и инструментальных съемок уровней воды и отметок дна в водотоках. Для закрытых дрен выход из строя может быть установлен по наличию застоя воды в колодцах и разрушений устьев. Однако часто при визуальном осмотре возможны ошибки. Поэтому нужны объективные критерии оценки работы дренажа.

Для определения работоспособности той или иной дрены, ее соответствия проектным параметрам дренажа пользуются показателем темпов сработки грунтовых вод на фоне дренажа после прекращения полива. В безнапорных условиях работа дренажа считается хорошей, если

темпы сработки уровня грунтовых вод составляют более 8—10 см/сут сразу после полива, удовлетворительными — в пределах 5—7 см/сут, неудовлетворительными — при меньших скоростях.

Более надежно оценивается работоспособность дрен по наблюдениям за изменением их приведенных расходов в зависимости от действующего напора. Для любой гидрогеологической схемы и конструкции дренажа существует расчетная зависимость.

Если отклонения фактических замеров расходов в дрене при известных средних коэффициентах фильтрации и действующих напорах находятся в пределах $\pm 20\%$, то можно считать, что дренаж работает нормально.

На фоне дренажа и орошения грунтовые воды постепенно опресняются до 2—5 г/л. При этом формируется определенное вертикальное расслоение грунтовых вод: сверху минерализация 2—5 г/л по плотному остатку, постепенно она увеличивается к дрене. Если дренаж работает нормально и сохраняется промывной режим, то эта закономерность наблюдается повсеместно. Наличие зон с повышенной минерализацией грунтовых вод с поверхности свидетельствует о застойных явлениях в них и о недостатке промывного режима либо о нарушениях в работе дренажа.

На основе данных эксплуатационной службы новой зоны Голодной степи по водному и солевому балансам орошаемого массива с 1966 по 1973 гг. была проанализирована динамика засоления метрового слоя почвогрунтов с 1961 по 1975 гг. Удельный дренажный сток за этот период возрос с 0,5 до 2,3 тыс. $м^3$/га, все остальные элементы водного баланса изменились мало. До 1967 г. ежегодно накапливалось до 10,4 т/га солей, а с 1968 г. мелиоративная обстановка складывалась благополучно: к 1973 г. за пределы орошаемой территории было вынесено 13—30 т/га солей.

ГЛАВА 7

ПРОМЫВКИ ЗАСОЛЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ФОНЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Средство борьбы с засолением на фоне дренажа — промывка. Промывка состоит в растворении солей и замене соленого почвенного раствора пресными водами. Для успешного осуществления промывок необходимо два условия: подача пресной воды в количествах, необходимых для соответствующей замены почвенного раствора, и возможность отвода вытесняемого минерализованного раствора за пределы активной зоны почвогрунтов с помощью естественного или искусственного дренажа.

Различают промывки капитальные и профилактические. Капитальные промывки требуют значительного количества воды (нормы промывки) — более 10 тыс. м³/га, которым стремятся рассолить почву до необходимого предела. Профилактические промывки снижают сезонное соленакопление в почвогрунтах или увеличивают рассоление, достигнутое при капитальных промывках, и проводятся в основном нормами 1,5—6 тыс. м³/га.

Вопросы обоснования промывок на фоне дренажа, технологии и методы повышения их эффективности рассматриваются в работах В. А. Ковды, В. В. Егорова, С. Ф. Аверьянова, В. Р. Волобуева, А. К. Бехбутова, В. М. Легостаева, Н. Г. Минашиной, Б. В. Федорова, Е. Г. Петрова, И. С. Рабочева и Э. С. Варунцяна.

В настоящее время четко выражены два различных подхода к освоению засоленных земель с помощью промывок на фоне дренажа. Первый состоит в том, что капитальные промывки проводятся до так называемого коренного опреснения почвогрунтов и грунтовых вод, при котором исключается возможность реставрации засоления. При таком методе глубина рассоления почвогрунтов должна быть, по данным И. С. Рабочева, В. М. Легостаева и других, больше 2 м, И. П. Айдарова — 1—2 м и А. А. Сидько, В. И. Бобченко — больше 1 м. При этом затраты воды на промывку резко возрастают, а соответ-

ственно этому возрастает и время проведения промывок. Так как солеотдача со временем снижается, удельная эффективность промывной воды по мере увеличения промывного периода уменьшается. Кроме того, как отмечал В. В. Егоров в своем докладе на техсовете Минводхоза СССР 26—28 января 1966 г., коренное опреснение для большинства связных грунтов не может быть достигнуто за 1—2 года. Попытки опреснить капитальными промывками засоленные земли сразу на большую глубину приводят и к нежелательным последствиям — вместе с вредными слоями вымываются и питательные элементы, а также полезные соли. Почвы теряют не только запасы своего низкого плодородия, но и превращаются в обесструктуренное тело, близкое по своим качествам к материнским породам. Не случайно, что в результате капитальных промывок, нормы которых превышают 30—40 тыс. м³/га и более, несмотря на отсутствие вредных солей в почве, добиться высоких урожаев на таких землях длительное время не удается.

Исходя из изложенного, учитывая невозможность подачи больших объемов воды на промывку из-за ее дефицита, в САНИИРИ совместно с Главсредазирсовхозстроем и проектным институтом «Средазгипроводхлопок» сформулирован принцип трехстадийного освоения земель с ускоренной промывкой небольшого верхнего слоя почвогрунтов.

Сущность этого способа освоения состоит в том, что капитальные промывки проводят на глубину так называемого начального рассоления 0—60 см, в пределах которого развивается основная часть корневой зоны. Допускается несколько повышенный порог токсичности за счет того, что последующее углубление промывного слоя осуществляется на фоне специальных культур-освоителей повышенной солеустойчивости или на фоне основной культуры, у которой солеустойчивость повышена специальными мерами, например внесением химических мелиорантов во время поливов повышенными нормами (рис. 44).

Начальное опреснение почвогрунтов по глубине требует детального обоснования.

Учитывая, что после промывки надо обеспечивать условия для нормального произрастания культур-освоителей, степень начального опреснения и его глубина определяются исходя из требований этих культур и интенсив-

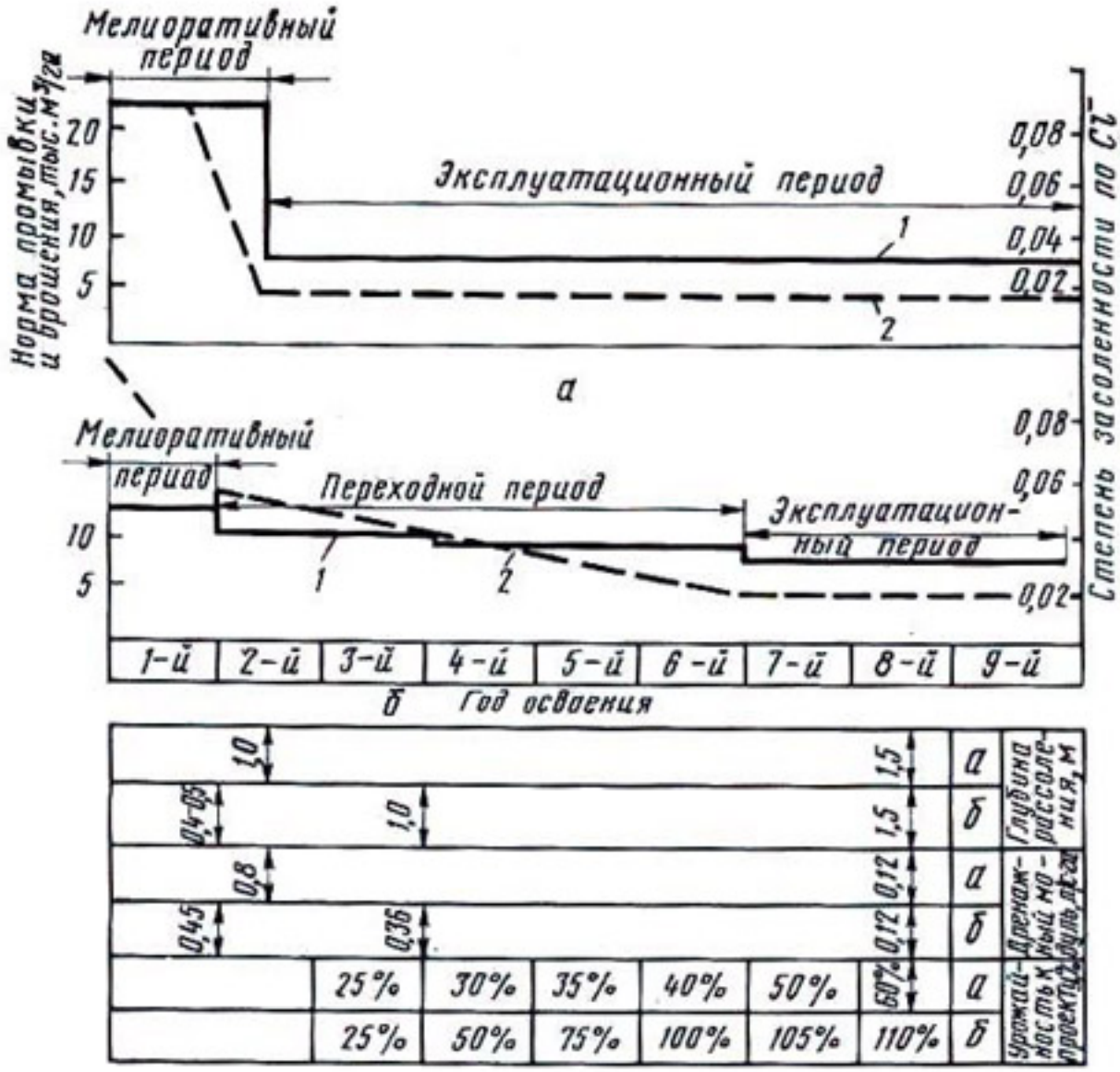


Рис. 44. Изменение основных показателей мелиорации сильнозасоленных земель при различных схемах освоения:

а — двухстадийное освоение; *б* — трехстадийное освоение; *1* — норма промывки; *2* — степень засоленности по Cl^-.

ности соленакопления от промывки до завершения вегетации.

Если, например, в качестве культуры-освоителя выбран хлопчатник, то необходимо к началу его произрастания для раннего периода роста обеспечить опреснение до порога токсичности на глубину 10 см. Этот порог, как известно, наиболее низок и составляет в условиях хлоридносульфатного засоления, по данным многочисленных исследований (С. Н. Рыжов, В. М. Легостаев, А. М. Нерозин и др.), 0,01% по Cl^-. Он снижается после начала цветения до 0,03%. При внесении химических мелиорантов, таких как МКАФ, эти пороги повышаются соответственно до 0,025; 0,045; 0,06%. Глубина корневой системы зависит от режима увлажнения. Если поливают при опти-

муме увлажнения, то есть при нижней границе 75% ППВ (Н. С. Петинов), то корневая система будет развиваться в основном в процессе цветения в слое 0—30 см и 0—45 см. При этом отдельные корни, уходящие вглубь, не будут играть существенной роли в водном питании. Наоборот, при перебоях в водопотреблении, снижении нижней границы увлажнения до 60% ППВ и ниже корневая система будет углубляться и тогда должна быть глубже зона опреснения.

Если освоитель — рис, то начальное опреснение должно быть доведено до 0,03% по Cl^- на глубину 20 см. После заливки чеков вследствие поддержания промывного режима токсичность не лимитируется. При других культурах-освоителях могут быть приняты соответствующие им пороги токсичности. Чтобы определить глубину и степень опреснения после капитальных промывок, необходимо установить срок конца полива, степень и глубину начального опреснения в зависимости от культуры-освоителя и рассчитать на основе теории солепереноса, как это было описано в главе 2, интенсивность соленакопления (в период от конца промывок до начала вегетации).

Можно исходить также из установления допустимых пределов минерализации почвенных растворов на ранней стадии развития растений. Так, для хлопчатника, как рекомендуют В. А. Ковда, С. Н. Рыжов и другие, предельно допустимые нормы минерализации почвенного раствора в ранней степени роста — 5—8 г/л, в развитом состоянии (после бутонизации) — 10—12 г/л.

Промывки на фоне горизонтального и вертикального дренажа имеют принципиальные отличия. Промывки могут быть в ненасыщенной и насыщенной зонах. Промывки в ненасыщенной зоне аэрации идут значительно более эффективно, чем в насыщенной, так как бóльшая часть почвы находится в сухом состоянии, поэтому основная часть солей — на поверхности почвенных агрегатов, а не в растворе.

Во второй стадии, когда почва насыщена водой, промывка идет за счет диффузного обмена и вытеснения растворимых солей (Летунов, 1958).

Вертикальный дренаж, располагая большим диапазоном расходов и темпов сработки уровня грунтовых вод, позволяет создать перед промывным поливом свободную емкость большой глубины — до 6—7 м, благодаря чему

вынос солей в значительной степени осуществляется при первой, а затем при второй стадии промывок. В этом случае скорость промывки равномернее по сравнению с горизонтальным дренажем при тех же расходах воды.

Более того, при вертикальном дренаже скорости и эффект свободной емкости могут быть усилены за счет установки на время промывок насосов большой мощности или дополнительного вакуумирования скважин.

При горизонтальном дренаже такой возможности нет, и промывка проводится в основном во второй стадии, когда почва насыщена водой. Вакуумирование дренажа для этой цели в связных грунтах не дало эффекта.

Для обеспечения равномерности промывки на всей площади очень важно, чтобы по всему междренью на второй стадии скорости были достаточны для вымыва солей. Это особенно нужно для связных грунтов, так как частицы воды находятся под действием агрегатных и капиллярных сил, противодействующих передвижению влаги в почве вниз к дренажу.

Различаются три этапа промывки на фоне горизонтального дренажа:

инфильтрация до смыкания с грунтовыми водами;

смыкание инфильтрации с грунтовыми водами и создание бугра грунтовых вод; обычно этот этап связан с началом работы дренажа;

после смыкания промывных и грунтовых вод и выхода их на поверхность.

Для того чтобы оценить влияние различных этапов на эффективность рассоления при промывках тяжелых грунтов, воспользуемся результатами опытов Г. Е. Батурина в совхозе № 6 Голодной степи (1968 г.).

Промывки проводились на фоне дренажа интенсивностью 60 м/га, глубиной 3,5 м в тяжелых и средних лессовидных суглинках с коэффициентами фильтрации 0,048—0,3 м/сут. Постоянный дренаж был усилен временным глубиной 0,9—1 м, интенсивностью 350 м/га.

Участок был оборудован створом наблюдательных скважин и кустами пьезометров глубиной 5, 7, 10, 12 и 16 м. Первый этап промывок, наиболее кратковременный, продолжался с 23 по 26 мая, второй этап — с 26 мая по 7 июня и третий этап — с 7 июня по 24 сентября (рис. 45). Количество воды за различные этапы при постоянном расходе пропорционально времени промывки. Отсюда ясна преобладающая роль третьего этапа. Средние темпы

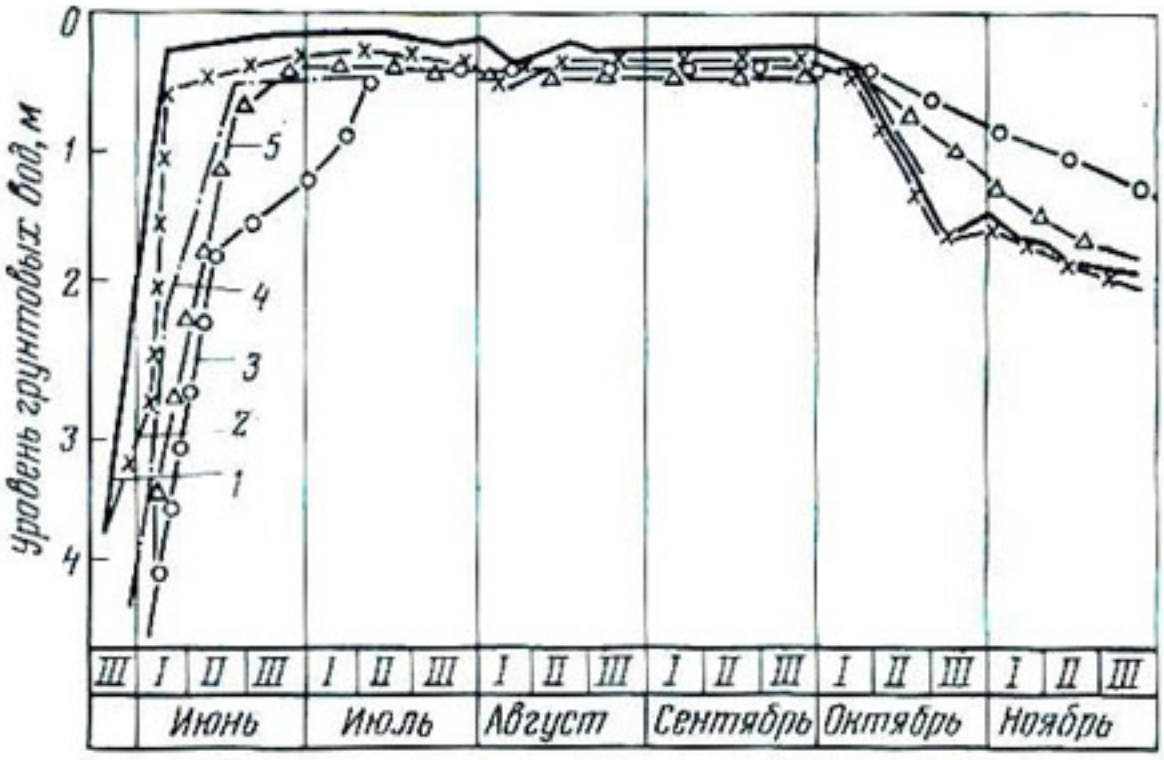


Рис. 45. Динамика уровней грунтовых вод по кусту промывного участка КП-II:

1 — по скважине; *2, 3, 4, 5* — по пьезометрам соответственно 7-метровому, 10-метровому, 12-метровому и 16-метровому.

подъема уровня грунтовых вод во втором этапе составляют 0,5—0,62 м/сут.

Для каждого этапа можно определить скорости фильтрации (Соколенко, 1976). В то же время, если на первом этапе скорость фильтрации будет равномерна по междренью и эффективность промывной воды максимальна, то во втором и третьем этапах распределение скоростей по междренью будет крайне неравномерно — максимальные скорости вблизи дрен и минимальные посредине междренья (рис. 46). В результате значительная часть воды вблизи дрен будет расходоваться нерационально. Оптимальные скорости для сероземов составляют 0,05—0,6 м/сут, по данным И. П. Айдарова, для оструктуренных почвогрунтов они в 2—3 раза меньше.

Имеются предложения о тактовой, расклинивающей и боковой промывках (Я. К. Левин, А. И. Калашников, В. И. Бобченко и др.), о промывках с распределяющимся фронтом затопления. Последнее промоделировано В. Н. Эмихом. Все эти предложения повышают эффективность действия промывной воды вблизи дрен, но увеличивают длительность промывок. Поэтому на период промывок следует усиливать закрытые дрены щелеванием

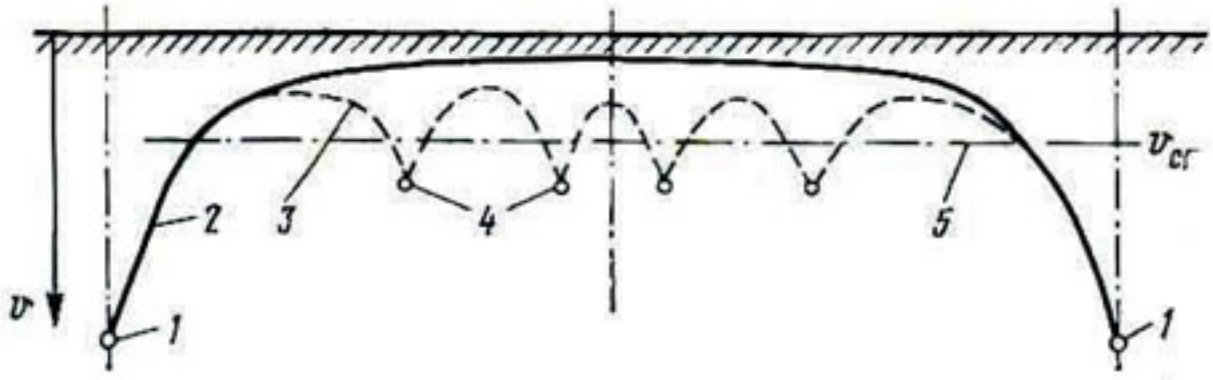


Рис. 46. Эпюра скоростей при промывке на фоне закрытого горизонтального дренажа:

1 — глубокие дрены; *2* — эпюра на фоне глубокого дренажа при B=200 м, H=3 м; *3* — то же, усиленного закрытым дренажем H=1,5 м; *4* — мелкие дрены; *5* — расчетная скорость промывки.

или кротовыми с креплением полимерными трубами на глубину 1,2—1,5 м, размещая их так, чтобы создать оптимальное поле скоростей фильтрации.

С учетом вида технологии применяются следующие промывки:

по большим чекам (0,2—4 га), устраиваемым в дамбах высотой до 1 м на фоне интенсивного закрытого горизонтального или вертикального дренажа при уклонах местности до 0,001, $K>0{,}5$ м/сут и нормах промывки более 10 000 м³/га. В этом случае удается резко сократить срок промывок и увеличить их равномерность;

по мелким чекам (0,02—0,08 га) при уклонах местности 0,001—0,005 и $K<0{,}5$ м/сут. При необходимости можно усилить дренированность мелкими временными дренами глубиной до 1 м при нормах промывки до 20 000—25 000 м³/га;

боковые или расклинивающие промывки при тех же условиях, но при нормах промывок более 20 000—25 000 м³/га проводятся полосами от середины междренья к краям;

по глубоким бороздам (25—30 см) при уклонах более 0,005 и необходимости капитальных промывок нормой до 10 000 м³/га.

По способам подачи воды промывки делятся на следующие виды:

постоянные, проводимые при высоком уровне минерализованных грунтовых вод и сильном испарении слоем воды более 10 см;

периодические, при которых заливка водой нормой 1200—2000 м³/га сменяется перерывами в 10—20 дней;

применяются при значительной водопроницаемости, глубоком уровне грунтовых вод и слабом испарении. По данным М. М. Эль-Габали, такие промывки на массиве Абис показали, что нормы промывок снижены более чем в 1,5 раза и, хотя время проведения их увеличилось на 40%, конечный результат оказался лучше. Этот метод промывок рекомендуется совмещать с глубоким чизелеванием и рыхлением.

Для илистых суглинков и глин, склонных к растрескиванию, Д. Нильсен, Д. Биггар и Д. Лютин на основе опытов рекомендовали промывать при ненасыщенной среде с помощью дождевания или периодической подачи воды. По данным Д. Лютина, прерывистое дождевание слоем 0,003 м в течение 30 с через каждые 30 мин при норме 2500 м³/га на щелочных пылеватых глинах рассолило их так же, как при постоянном затоплении нормой 7400 м³/га, но значительно быстрее.

Таким образом, капитальные промывки на фоне горизонтального дренажа позволяют достичь первичного опреснения почвогрунтов, которое углублено в переходный период профилактическими промывками. При достаточном опреснении глубоким дренажем, который снимает подсос солей в капиллярную зону, можно совсем отказаться от профилактических промывок.

ГЛАВА 8

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЗАКРЫТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА И ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Дренаж орошаемых территорий — важнейшее условие высокопродуктивного использования земельно-водных ресурсов. Надежный дренажный фон позволяет увеличивать продуктивность земель, урожайность и валовой сбор сельскохозяйственной продукции, улучшить условия выращивания растений путем создания условий для борьбы с засолением с помощью промывок и промывного режима орошения, регулирования водно-воздушного и водно-солевого режимов почвогрунтов, улучшения аэрации почвы, регулирования испарения.

Преимущества закрытого горизонтального дренажа перед открытым состоят в создании оптимальных мелиоративных режимов, повышении коэффициента земельного использования, предотвращении смыва и потерь удобрений и, следовательно, увеличении эффективности их действия, росте производительности труда за счет лучших условий механизации обработки, сокращении оросительных норм и эксплуатационных расходов.

Кроме того, закрытый дренаж имеет огромное общественное значение, стабилизируя сельскохозяйственное производство, уменьшая вредное воздействие грунтовых вод, солей и пестицидов на здоровье.

Дренаж играет важную роль в предотвращении и уменьшении вредного воздействия человека на окружающую среду. Интенсивная мелиорация засоленных земель со сбросом возвратных вод в реки — источники орошения создает опасность резкого ухудщения качества воды, что неизбежно влечет большой экономический ущерб. Чтобы уменьшить загрязнение рек, необходимо расширять зоны с оптимальным мелиоративным режимом. Создание оптимальных мелиоративных режимов должно сопровождаться совершенствованием управления оросительной водой таким образом, чтобы обеспечивать рассоление при минимальном сбросе излишних вод с системы. Для этого

необходимо овладеть системой взаимодействия грунтовых и поливных вод.

Существующие методики расчета экономической эффективности дренажа не учитывают в полной мере все эти факторы. Поэтому иногда они приводят к неправильным выводам о неэкономичности горизонтального закрытого дренажа.

Действительно, сравним открытый и закрытый дренаж с равными глубиной и протяженностью (40 м/га) по капитальным вложениям, эксплуатационным затратам, изменению доходов и др.

За основу принимаем формулу приведенных затрат:

$$E = Kn + И \pm \Delta Д, \qquad (219)$$

где E — приведенные затраты; K — капитальные вложения; n — коэффициент нормативной эффективности ($n = 0{,}12$); И — эксплуатационные издержки; ΔД — изменение чистого дохода.

В качестве исходных данных используем обобщенные результаты авторов по Голодной степи (В. А. Духовный, С. Усманов) (табл. 18).

По существующей методике получается, что открытый дренаж эффективнее, чем закрытый горизонтальный. В связи с этим В. А. Духовным, К. И. Белоцерковским были предложены дополнения и поправки, с помощью которых можно оценить большинство из неучтенных факторов эффективности, проявляющихся при выборе типа дренажа.

Таблица 18. **Сравнительные технико-экономические показатели горизонтального дренажа по существующей методике**

Показатели	Дренаж	
	открытый	закрытый
Капитальные вложения К, руб/га	420	960
Эксплуатационные издержки И:		
руб/м	0,45	0,258
руб/га	18	13,2
Коэффициент земельного использования (к. з. и.)	0,85	0,95
Прирост к. з. и.	—	0,1
Дополнительный доход от растениеводства при коэффициенте хлопковости 0,6 на гектар дренируемой территории ΔД, руб.	—	26,4
Приведенные затраты Е, руб.	68,4	102,0

В первую очередь, это относится к изменению расходования воды при изменении характера дренажа. Этот вопрос представляет определенную сложность в связи с отсутствием в стране платы за воду. Поэтому эффект по воде может оцениваться только в сфере народнохозяйственного дохода. При этом исходим из того, что для государства экономия водных ресурсов в каком-то бассейне, например в результате строительства дренажа и перехода на оптимальный мелиоративный режим с меньшими удельными расходами воды, эквивалентна высвобождению капитальных вложений на формирование водных ресурсов, включая регулирование стока, а также транспортировку и подачу воды на орошение. Затраты на транспортирование и подачу воды на орошение от источника орошения до поля, по данным С. А. Полинова, в среднем для Средней Азии составляют 2,49 коп/м³.

Стоимость формирования водных ресурсов — величина переменная, резко возрастающая по мере исчерпания водных ресурсов в бассейне. Так, по бассейну р. Сырдарьи в 1955—1965 гг. стоимость формирования дополнительных водных ресурсов составляла 8 коп/м³, в 1965—1975 гг.— 12 коп/м³, а в 1975—1980 гг. она достигнет 16 коп/м³. Последующее увеличение водных ресурсов здесь возможно только за счет более глубокой степени зарегулирования стока, а также за счет использования некоторых запасов подземных вод и сибирских вод, стоимость формирования которых составляет в настоящее время соответственно 27 и 35—40 коп/м³.

Исходя из этого, следует учитывать стоимость сэкономленной на 1 га воды при переходе от одного мелиоративного режима к другому в виде

$$Э_в = \Delta \overline{W} (К_в n + И_в), \qquad (220)$$

где ΔW — количество сэкономленной воды на 1 га; $К_в$ — удельные капитальные вложения на 1 м³ воды в бассейне; $И_в$ — эксплуатационные издержки на 1 м³ воды в бассейне.

Для определения расхода воды на гектар обратимся к данным главы 6, где было показано, что открытый дренаж глубиной 2,8—3 м поддерживает уровень грунтовых вод на глубине 1,5 м, а закрытый горизонтальный дренаж с той же глубиной — в среднем на глубине 2,2 м. Эта разница в глубинах стояния грунтовых вод дает экономию воды на 1 га при закрытом дренаже в условиях Голодной степи 1200 м³/га (см. рис. 17 главы 2).

Наряду с этим внедрение закрытого дренажа вместо открытого увеличивает производительность механизмов и машин при обработке, так как размеры поливных карт увеличиваются до оптимальных.

Повышение производительности труда бесспорно приносит чистый доход хозяйству. Эффект от сокращения трудоемкости и машиноемкости при увеличении размера поливного участка может быть определен как

$$П_{п_1} = \frac{\Sigma \Delta П З}{Ф}, \qquad (221)$$

где ΔП — количество условно высвобожденных работников; З — среднегодовая зарплата одного высвобожденного работника; Ф — удельный фонд заработной платы по всем сэкономленным затратам.

Наряду с этим необходимо учитывать и народнохозяйственную эффективность снижения затрат труда.

Для этой цели целесообразно использовать рекомендации П. Клемешева, согласно которым определяются средние затраты в отрасли по стране на высвобождение одного работника $В_э$. Так, по сельскому хозяйству они составляют 4,9 тыс. руб. на 1 человека.

Тогда народнохозяйственный эффект от повышения производительности труда при этом равен

$$Э_{п_2} = \sum \Delta П B_э E. \qquad (222)$$

На основе изложенного общий народнохозяйственный эффект от дренирования земель следует вычислять по разнице приведенных затрат, учитывающих поправки авторов:

$$Е_{их} = Кn + И \pm \Delta Д \pm Э_в \pm (Э_{п_1} + Э_{п_4}). \qquad (223)$$

Уточненные технико-экономические показатели горизонтального дренажа приведены в таблице 19.

Из таблицы 19 видно, что даже такая небольшая экономия воды делает переход на закрытый дренаж очень экономичным мероприятием.

Следует напомнить, что по ряду местностей с повышенной водоотдачей грунтов и большим испарением экономия воды от перехода на закрытый дренаж составляет до 4—5 тыс. м³/га (например, в Хорезме), что еще больше усилит эффект перехода на закрытый горизонтальный дренаж.

В приведенную выше методику следует внести еще одно дополнение, связанное с сутью мелиорации.

Таблица 19. **Уточненные технико-экономические показатели горизонтального дренажа**

Показатели	Дренаж	
	открытый	закрытый
Расход воды $\Delta\overline{W}$, м³/га	1200	—
Приведенные затраты по воде (руб/га) при ее стоимости:		
12 коп/м³	448	—
40 коп/м³	112	—
Экономия трудовых затрат (руб/га):		
внутрихозяйственная	—	—5,4
народнохозяйственная	—	—14,7
Итого приведенных затрат при указанной стоимости воды, руб/га	116,4	81,9
То же, с учетом переброски стока сибирских рек, руб/га	180,4	—

К. Маркс в «Капитале» писал, что мелиорация «изменяет физические, отчасти и химические свойства почвы посредством операций, стоящих затрат капитала, и которые могут рассматриваться как вложение капитала в землю,— почти все сводятся к тому, чтобы определенному участку земли, почве в определенном ограниченном месте придать такие свойства, которыми другая почва, в другом месте, зачастую совсем близко, обладает от природы»*.

Тем самым подчеркивается долговременный эффект мелиораций. Очень важно здесь то, что эффект мелиораций сводится не только к получению чистого и народнохозяйственного дохода, но и к созданию определенных, постоянно действующих в будущем новых природных условий, обеспечивающих долговременную возможность дальнейшего повышения плодородия земель. Исходя из этого, было бы правильно учитывать этот эффект от затраты части капитала, вложенного на повышение естественного плодородия почв, переводом их по продуктивности из низшего класса в высший, как разницу $П_к — П_0$, где $П_к$ и $П_0$ соответственно продуктивность земли после проведения мелиоративных работ и до их начала.

---

* Маркс К. и Энгельс Ф. Сочинения. Т. 25, ч. II, гл. 44. М., 1962, стр. 303.

Тогда формула (223) приводится к виду

$$E_{их} = [К - (П_к - П_0)]n + И \pm \Delta Д \pm Э_в \pm (Э_{п_1} + Э_{п_2}) \quad (224)$$

Такое добавление важно для оценки не только положительного влияния мелиорации на земли, но и отрицательного при неправильном проведении работ. Если отсутствие дренажа при избыточном орошении приводит к засолению земель, то величина $П_к - П_0$ может стать отрицательной и, следовательно, снизится эффективность мелиорации.

Такая методика позволяет оценивать долговременность проектируемых и осуществленных мелиоративных мероприятий. Например, в отдельных зонах земли осваивают без достаточной мелиоративной подготовки. Хотя в течение какого-то первого периода освоения земель достигается и чистый и народнохозяйственный эффект в виде налога с оборота, но земли при этом качественно ухудшаются. В результате этого они по бонитировке должны быть переведены из высшего класса в низший. Расчеты с использованием формулы (224) подтверждают, что такое освоение земель неэффективно.

Для наглядности указанного положения рассмотрим опыт дренирования земель совхоза № 6 Голодной степи и его эффективность. Исходная глубина залегания грунтовых вод колебалась от 5 до 20 м (табл. 20).

Таблица 20. **Глубина залегания грунтовых вод в совхозе № 6 Голодной степи**

Глубина грунтовых вод, м	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г.
Средневзвешенная	12,8	8,3	5,87	5,91	3,4	3,4
Максимальная	20,0	20,0	20,0	16,94	12,3	10,2
Минимальная	5,0	2,0	1,0	0,26	0,38	0,96

Продолжение

Глубина грунтовых вод, м	1967 г.	1968 г.	1969 г.	1970 г.	1971 г.	1972 г.
Средневзвешенная	2,9	3,1	3,2	2,98	2,92	2,81
Максимальная	7,7	6,0	5,3	4,42	4,25	4,07
Минимальная	1,0	1,1	1,2	1,75	1,57	1,45

Предполагалось, что грунтовые воды будут подниматься постепенно, медленными темпами. Для отвода грунтовых вод предусматривались коллекторы протяженностью 39 км и дрены — 134 км. После начала орошения в 1961 г. уже в течение первых двух лет был отмечен очень быстрый подъем уровня грунтовых вод — в среднем по 3—3,5 м в год. Это ухудшило естественное плодородие почв. Уже в 1964 г. было развернуто широкое строительство горизонтального дренажа и коллекторов (табл. 21). В результате этого удалось создать на всей площади совхоза надежную дренажную сеть, которая в 1967—1968 гг. уменьшила глубину грунтовых вод и снизила запасы солей в активном слое почвогрунтов.

Таблица 21. **Объем коллекторно-дренажной сети в совхозе № 6 Голодной степи**

Год	Протяженность, км			Удельная протяженность, м/га
	коллекторов	дрен	всего	
1963	58,5	46,0	104,5	9,1
1964	111,9	115,0	226,9	19,9
1965	111,9	198,0	309,9	27,3
1966	111,9	293,8	405,7	35,8
1967	111,9	380,1	492,0	43,5
1968	111,9	468,6	580,5	51,6
1969	111,9	574,5	686,4	60,6
1970	111,9	677,7	789,6	74,6
1971	111,9	692,1	804,0	76,1
1972	111,9	692,1	804,0	76,1

В таблице 22 приведены данные, характеризующие изменение объема отвода дренажных вод и солей с территории совхоза, а также изменение площадей засоления по мере строительства закрытого дренажа. Из таблицы видно, что пока интенсивность дренажа не достигла нужных величин, наблюдалась тенденция к снижению урожайности. Она могла привести, как это было в совхозе № 5, к исключению из сельскохозяйственного оборота значительного количества земель.

Динамика показателей свидетельствует о том, что перелом в мелиоративном состоянии наступил только в 1968 г., когда накопление солей в активной толще почвогрунтов прекратилось. Земли с засолением, недопустимым для развития растений, начали резко уменьшаться.

Таблица 22. **Мелиоративные показатели земель совхоза № 6 Голодной степи**

Год	Дренированность земель на конец года, м/га	Среднегодовой дренажный модуль, л/с · га	Отвод солей, за год, т/га	Площадь земель, тыс. га			Урожайность, ц/га
				слабозасоленных и незасоленных	среднезасоленных	сильнозасоленных	
1963	9,1	0,056	3,2	6,64	2,69	1,27	20,6
1964	19,9	0,056	3,9	нет данных			21,3
1965	27,3	0,084	7,6	—	—	—	24,0
1966	35,8	0,129	11,2	—	—	—	20,1
1967	43,5	0,127	25,7	3,46	4,68	2,46	19,3
1968	51,6	0,154	32,2	4,77	4,10	1,73	21,8
1969	60,0	0,164	63,4	5,94	3,36	1,30	18,6*
1970	74,6	0,095	22,6	7,03	2,48	1,09	25,2
1971	76,1	0,128	32,1	7,07	3,13	0,40	25,2
1972	76,1	0,124	35,6	7,49	2,83	0,28	29,2
1973	76,1	0,126	33,2	8,93	1,67	0,14	30,5

* В 1969 г. природные условия были крайне неблагоприятны для выращивания хлопка во всей Средней Азии.

Таким образом, эффективность дренажа в совхозе № 6 в первую очередь выразилась в том, что улучшенная мелиоративная обстановка позволила не только достигнуть прежней урожайности, но и значительно повысить ее за счет применения и совершенствования комплекса агротехнических мероприятий. Дальнейшая работа дренажа продолжает улучшать мелиоративную обстановку. Наряду с активным слоем почвогрунтов опресняются и грунтовые воды до такой степени, что становится возможным уменьшить оросительную норму за счет ликвидации промывного режима орошения и использования опресненных грунтовых вод.

Чтобы определить влияние дренажа на эффективность сельскохозяйственного производства, проследим за изменением урожайности хлопка-сырца по совхозу, как основного показателя продуктивности земель, по мере освоения территорий и строительства дренажа. Известно, что, кроме мелиоративных условий, на урожайность сельскохозяйственных культур влияет агротехника (сорт, удобрения и др.). В совхозе с самого начала работ был взят курс на применение передовой агротехники, максимальной механизации всех работ, поэтому агротехника оставалась стабильной, расход удобрений на гектар колебался незначительно. Изменение доли внесения удоб-

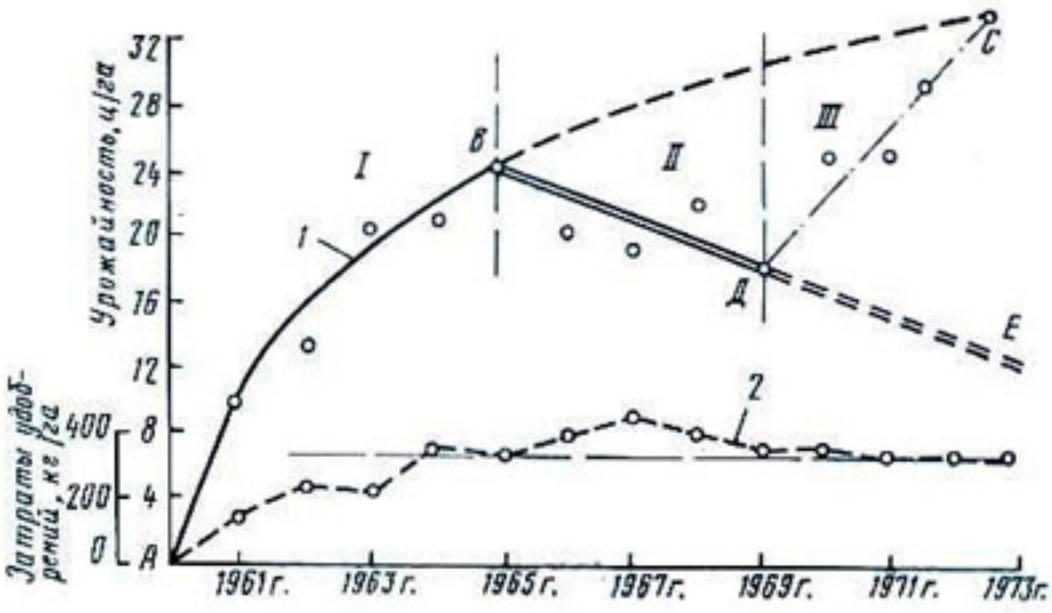


Рис. 47. Влияние горизонтального закрытого дренажа на урожайность хлопчатника (*1*) и на затраты удобрений (*2*).

рений (рис. 47), которая незначительно отличалась от средней и, видимо, существенно на динамике урожайности, как и другие факторы, не сказалось. Здесь можно выделить три характерные зоны:

I — начальный период освоения 1961—1965 гг.; дренаж строится очень медленно, однако в связи с тем, что подъем уровня грунтовых вод пока не достиг повсеместно активного слоя, соленакопления в нем не наблюдается, урожайность постепенно поднимается (участок кривой *АВ*);

II — период увеличения засоления земель (1965—1969 гг.); развернутые работы по строительству дренажа не могут опередить темпов развивающегося процесса вторичного засоления, так как сильноминерализованные грунтовые воды поднялись на всей территории к активной зоне; урожайность (участок *ВД*) падает постепенно;

III — период обеспеченной дренированности всей территории совхоза (1969—1973 гг.); удельная протяженность дренажа достигла проектных показателей, начинается и постоянно развивается на фоне дренажа постепенный процесс рассоления, урожайность поднимается (участок *ДС*) до первоначального уровня прогрессирующих значений.

На рисунке 47 видно, что если бы не допускалось ухудшение мелиоративного состояния введенных земель при своевременном строительстве дренажа, нарастание урожайности шло бы по экстраполируемой кривой *АВС*.

Эти данные совпадают с данными роста урожайности совхозов новой зоны, где дренаж построен одновременно с вводом земель в эксплуатацию (совхозы № 11, 12, 20, 25, 27, 28 и др.).

Для определения эффективности капитальных вложений в дренаж в совхозе № 6 сделаем расчет окупаемости для трех вариантов (табл. 23):

Таблица 23. Расчет эффективности дренажа в совхозе № 6 в Голодной степи

Показатели	№ варианта		
	1	2	3
Капитальные вложения в строительство водохозяйственных и производственных объектов совхоза, руб/га	3860	4740	4420
Чистый доход в среднем за год, руб/га	—60	130	162
Расход воды в хозяйстве, $м^3$/га брутто	10360	8920	7200
Разница по отношению к варианту № 1		—1440	—3160
Приведенные затраты (руб/га) по воде при ее стоимости 12 коп/$м^3$		+57	+127
Затраты труда на гектар:			
чел/дн.	116	72	64
человек в год	0,445	0,274	0,242
Разница по отношению к варианту № 1		—0,171	—0,203
Экономия за счет увеличения производительности труда по государственному доходу, руб/га		+86	+99
Исходная продуктивность $П_0$	340	340	340
Конечная продуктивность $П_к$	300	1200	1280
$П_к—П_0$	—40	860	940
Итого $Е_{нх}$	553	192	31

дренаж ограничен размерами первоначального проекта (дренажа недостаточно), идет постепенное ухудшение мелиоративного состояния земель;

дренаж построен в соответствии с проектом, но с опозданием по сроку;

дренаж построен в соответствии с проектом одновременно с системой.

В первом варианте в процессе освоения урожайность растет по кривой *AB* (рис. 47), а затем снижается по линии *BE* до нуля к 1980 г., то есть земли без строительства дренажа практически вышли бы из сельскохозяй-

ственного оборота вследствие засоления; во втором варианте процесс освоения идет, как было в действительности, урожайность изменяется по линии *ЛБДС*; в третьем варианте урожайность растет по линии *АВС*.

Отсюда видна высокая экономическая эффективность строительства закрытого дренажа особенно до начала освоения в полном проектном объеме и наглядная применимость предлагаемых поправок к методике эффективности капитальных вложений в мелиоративные объекты.

Однако надо знать, при каких темпах подъема уровня грунтовых вод дренаж необходим до начала освоения, а при каких — можно временно воздержаться. Для этого сравним два варианта: дренаж построен одновременно с оросительной сетью до освоения земель и дренаж построен к периоду подъема грунтовых вод до опасного уровня, при котором происходит ухудшение мелиоративного состояния земель.

В первом варианте экономим капитальные вложения, облегчаем условия строительства и повышаем исходную продуктивность земли в процессе освоения, но обычно замораживаем до некоторой степени капитальные вложения, увеличиваем эксплуатационные затраты. Во втором варианте достигается отсрочка строительства, но темпы работ и доход несколько снижаются. Сопоставление этих вариантов по методу приведенных затрат с учетом фактора дисконтирования проведено автором по выражению

$$\sum_{0}^{T} E_1 = nK_1(1+n)^{T-1} + \sum_{\substack{0 \\ t=1}}^{T-1} Э_1(1+n)^{\binom{(t-2)}{t}} +$$

$$+ \Delta Д_1(1+n)^{T-3} \geqslant \sum_{0}^{T_1} E_2 = \frac{nK_2 + Э_2 + \Delta Д_2}{T_1} \sum_{\substack{0 \\ t=1}}^{T_1} (1+n)^t_t,$$

где Е, К, ΔД, Э — соответственно приведенные затраты, капитальные вложения, потери продуктивности, эксплуатационные затраты в первом и втором вариантах; n — коэффициент нормативной эффективности $n=0{,}12$; Т — срок строительства при первичном освоении; T_1 — срок строительства до освоения.

По указанной методике, Н. С. Козуб обобщил данные по Голодной степи и проанализировал, что при сроке

подъема грунтовых вод до 9 лет дренаж необходимо строить до освоения, при большем сроке надо воздержаться на ряд лет. Эффективность работы горизонтального дренажа в дальнейшем будет еще больше повышаться за счет совершенствования методов и средств механизации для его строительства, улучшения конструкции и качества дренажа, повышения эксплуатационной надежности, улучшения научных исследований и ускоренного внедрения их результатов в производство.

Усовершенствование конструкций дренажа должно в первую очередь идти по пути создания экономичных фильтров дренажа. Необходимо усилить поиски других искусственных фильтров, имеющих, кроме того, и повышенную долговечность и сохранность прочностных и фильтрующих свойств во времени. Следует также углубить изучение минимально допустимой толщины слоя фильтра в зависимости от его коэффициента фильтрации, качества поступающего материала и переформирования фильтра в процессе эксплуатации.

Перспективно также создание конструкций дрен, у которых трубофильтр формируется непосредственно из грунта при помощи полимерных структурообразователей и других физико-химических процессов. Однако пока эти работы не вышли из стадии лабораторного опыта.

Несмотря на значительные успехи в технологии и методах строительства дренажа на орошаемых землях, здесь имеются большие возможности для дальнейшего совершенствования и удешевления работ. До настоящего времени недостаточно решена задача строительства дренажа особенно в тяжелых, плотных, сильно загипсованных грунтах. Необходимо ускорить переход на устройство корыта под дреноукладчики с помощью специального механизма взамен скреперов.

Абсолютно не решены вопросы автоматизации контроля качества укладки дренажных труб по отметкам, правильной стыковки и др. Необходимо создать комплекс машин для реконструкции открытых дрен в закрытые при переустройстве орошаемых земель. Целесообразно решить вопрос о бестраншейном методе укладки не только полиэтиленовых, но и керамических труб.

Требуется улучшить конструкции устьевого сооружения и колодца, механизацию устройства закрытых коллекторов как из гончарных, так и из монолитных бетонных труб, механизацию строительства колодцев и др.

Разработка и внедрение системы пооперационного контроля строительства дренажа могут резко повысить надежность его работы.

При назначении параметров дренажа, расчете мелиоративных мероприятий следует учитывать изменение водно-физических и физико-химических свойств почвогрунтов при орошении.

Различными исследователями установлено явление экранирования дренажа обратной засыпки грунтов, нарушенной структуры. В связи с этим следует уточнить влияние этого явления на снижение притока к дренам и учитывать это при разработке технологии строительства дренажа. Наконец, необходимо теоретически установить расчетный модуль дренажа, исходя из решения пространственной задачи дренаж — полив. Это позволит в значительной мере снизить расчетную интенсивность дренажа в эксплуатационный период.

Важно уточнить, кроме того, взаимодействие оросительных каналов с дренажем в пространстве, влияние первичной и вторичной напорности. Это позволит приблизить математическую модель к реальной действительности.

Наибольшее число «белых пятен» имеется в вопросах эксплуатации горизонтального дренажа. Мелиоративную службу следует оснастить современными приборами. Большую помощь при решении этих вопросов могут оказать методы дистанционного зондирования, аэрокосмических съемок для наблюдений за различными мелиоративными показателями в региональном масштабе.

В области эксплуатации не решены вопросы технологии очистки заиленных коллекторов с диаметром труб 250 мм и более, обнаружения мест закупорки дренажа, диагностирования выхода из строя дрен, очистки и восстановления фильтра, механизированной очистки колодцев, восстановления устьев и др.

Наряду с развитием проблем собственно дренажа значительный эффект может дать и расширение знаний в области мелиораций особо засоленных грунтов на фоне дренажа в условиях орошаемых земель. Здесь следует признать, что пока недостаточно глубоко разобрались во всем механизме и закономерностях явлений в природной среде, протекающих в процессе развития и изменения характера орошаемого земледелия в общей сфере экологических систем. Отсюда возможны различные не-

предвиденные последствия в результате вмешательства в естественную обстановку.

Необходимо на основе проработок, с одной стороны, расширить исследования закономерностей солепереноса с учетом отбора солей корнями растений, явлений сорбции, особенно в ненасыщенной среде, в различных грунтовых условиях. С другой стороны, эти, а также ранее полученные закономерности должны быть доведены до стадии программы, алгоритмов, номограмм, позволяющих упростить методы расчета, учитывающих все указанные выше факторы, до возможностей инженерного применения.

Исходя из представляемых в настоящее время моделей взаимосвязи системы почва — воздух — растение — грунтовые воды, постоянно изменяющихся под действием климатических, гидрогеологических и антропогенных факторов, целесообразно рассматривать процесс водопотребления растений дискретно, добиваясь при этом в различные периоды с помощью управления доступными нам факторами (изменение уровня грунтовых вод с помощью дренажа, подача оросительной воды и др.), создания оптимальных условий для растений при минимуме затрат. Для этого наряду с уточнением математической модели необходимо расширить диапазон определения агрофизических и физико-химических показателей грунтов. Это облегчит проектирование процессов водопотребления для местных условий.

При этом проявляется острая потребность в развитии специального мелиоративного приборостроения, как отрасли, которая должна была бы оснастить мелиораторов и работников сельского хозяйства не только методами и средствами определения таких характеристик, как капиллярные свойства грунтов, показатели сорбции, интенсивность физического испарения и транспирации и других, но и таких широко распространенных и остронеобходимых в повседневной работе, как степень засоления, влажность, плотность почвогрунтов и др.

Развитие дальнейших исследований, совершенствование строительства и эксплуатации горизонтального дренажа позволяет повысить его долговечность и экономичность, сделать его надежным средством регулирования водно-воздушного и водно-солевого режимов почвогрунтов на орошаемых землях.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамов С. К., Дегтярев Б. М., Корниенко И. В. Горизонтальные дренажи с трубофильтрами из пористого бетона. М., Стройиздат, 1976.

Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод.— В сб.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., АН СССР, 1956.

Аверьянов С. Ф., Цюй Син-е. О расчете дренажа при наличии инфильтрации. М., «Изв. АН СССР», 1957, № 3.

Аверьянов С. Ф. Горизонтальный дренаж при борьбе с засолением орошаемых земель. М., АН СССР, 1959.

Аверьянов С. Ф. Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и меры борьбы с ним в европейской части СССР. М., «Колос», 1965.

Аверьянов С. Ф., Голованов А. И., Никольский Ю. Н. Расчет водного режима мелиорируемых земель.— «Гидротехника и мелиорация», 1974, № 3.

Анализ динамики подземных вод аналитическими и численными методами. Ташкент, «Фан», 1975. — Авт.: Ф. Б. Абуталиев, М. Б. Баклушин, Я. С. Ербеков и др.

Айдаров И. П. К вопросу обоснования режима орошения и параметров дренажа на засоленных или склонных к засолению землях. — В сб.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М., «Колос», 1971.

Айдаров И. П., Пестов Л. Ф. К вопросу обоснования расчетных значений запасов солей в почвогрунтах при проектировании промывок засоленных земель. — В сб.: Проблемы генезиса и мелиорации орошаемых почв. М., «Наука», 1973, часть 1.

Айдаров И. П., Каримов Э. К. Некоторые вопросы обоснования мелиоративных режимов орошаемых земель при проектировании оросительных систем. — «Водные ресурсы», 1974, № 2.

Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория фильтрации жидкости и газа в недеформируемой пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1953.

Баклушин М. Б. О движении бугра грунтовых вод при наличии инфильтрации и системы точечных дрен, лежащих на водоупоре. — «Научные труды ТашГУ». Ташкент, 1964, вып. 242.

Баклушин М. Б., Рекс Л. М., Хлебникова И. Б. К задаче рассоления в среде с гетерогенным поровым пространством.— В сб.: ТашПИ. Ташкент, 1972, вып. 85.

Березнер А. С. О расчете закрытого горизонтального дренажа на орошаемых землях. — «Гидротехника и мелиорация», 1971, № 6.

Бондаренко Н. Ф. Физические основы мелиорации почв. М., «Колос», 1975.

Вавилов А. П. Прогноз уровня грунтовых вод при проектировании дренажа. Вопросы гидротехники и мелиорации. — «Труды ТИИИМСХ». Ташкент, «Фан», 1971, вып. 30.

Васильев В. А. О форме бугра грунтовых вод между двумя дренами на водоупоре при наличии инфильтрации. — «Известия АН СССР». Прикладная математика и механика. М., 1955, т. XIX, вып. 1.

Ведерников В. В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. М.—Л., Госстройиздат, 1939.
Гаврилко В. М. Фильтры водозаборных, водопонизительных и гидрогеологических скважин. М., Изд-во литературы по строительству, 1968.
Гейнц Р. А., Еременко Г. В., Усманов А. У. Солевой биодренаж.— «Труды САНИИРИ». Ташкент, 1973, вып. 199.
Голованов А. И. Прогнозирование водного режима орошаемых массивов в условиях совместной работы вертикального и горизонтального дренажей. — «Труды координационных совещаний по гидротехнике». Л., «Энергия», 1967, вып. 35.
Голованов А. И., Новиков О. С. Математическая модель переноса влаги и растворов солей в почвогрунтах на орошаемых землях. — «Труды МГМИ». М., 1974, т. 36.
Донской Г. В. Исследование пропускной способности водоприемной поверхности трубчатого дренажа. — «Труды ВНИИ ВОДГЕО». Инженерная гидрогеология. М., 1969, вып. 22.
Дунин-Барковский Л. В. Физико-географические основы ирригации. М., «Наука», 1976.
Духовный В. А. Орошение и освоение Голодной степи. М., «Колос», 1973.
Егоров В. В. Роль различных способов полива в регулировании солевого режима почв. — «Труды Почвенного института». М., 1975.
Зайдельман Ф. Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. М., «Колос», 1975.
Истомина В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов. М., Госстройиздат, 1957.
Кац Д. М. Влияние орошения на грунтовые воды. М., «Колос», 1976.
Ковда В. А., Егоров В. В. Закономерности процессов соленакопления в пустынях Арало-Каспийской низменности. М., АН СССР, 1954, том XIV.
Ковда В. А. Основы учения о почвах. М., «Наука», 1974.
Козлов В. С. Расчет дренажных сооружений. М., Госстройиздат, 1940.
Кононов И. В., Насиковский В. П. Методика оценки фильтрационных деформаций в области контакта защищаемого грунта и дренажного фильтра. — В республиканском межведомственном тематическом сборнике: «Мелиорация и водное хозяйство». Киев, «Урожай», 1974, вып. 30.
Кононов И. В. Совершенствование конструкций горизонтального дренажа для ирригационного строительства. Киев, УкрНИИГИ, 1975.
Костяков А. Н. Основы мелиораций. М., Сельхозгиз, 1960.
Лактаев Н. Т. Полив хлопчатника по бороздам в Средней Азии. Прогрессивные способы орошения, ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1975.
Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод. М., «Недра», 1976.
Легостаев В. М. К вопросу мелиорации Голодной степи. Ташкент, 1951.
Летунов П. А. Некоторые закономерности передвижения воды и солей в орошаемых почвах и значение травопольной системы земледелия в борьбе с засолением. М., АН СССР, 1955, вып. IV.

Летунов П. А. Почвенно-мелиоративные условия в низовьях Амударьи. — «Труды Арало-Каспийской экспедиции». М., АН СССР, 1958.
Малыгин В. С. Изучение дренажа в УзССР. Ташкент, 1950.
Минашина Н. Г. Физико-химическая модель расчета нормы воды для промывки засоленных почв. — «Почвоведение», 1972, № 3.
Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики. М., «Недра», 1969.
Мирцхулава Ц. Е. Надежность гидромелиоративных систем. М., «Колос», 1974.
Мурашко А. И., Климков В. Т. Влияние размеров и расположения продольной щелевой перфорации пластмассовых дрен на их водозахватную способность. Экспресс-информация. «Мелиорация и водное хозяйство». М., ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1969, сер. 2, вып. 4.
Мурашко А. И. Горизонтальный пластмассовый дренаж. Минск, «Урожай», 1973.
Насиковский В. П. Расчет горизонтального систематического дренажа в неоднородно-слоистых грунтах. Вопросы почвенных мелиораций и мелиоративной гидрогеологии. Киев, «Урожай», 1969.
Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Энерго- и массообмен в системе растение — почва — воздух. Л., Гидрометеоиздат, 1975.
Олейник А. Я., Насиковский В. П. Расчет систематического несовершенного горизонтального дренажа в однородном грунте при неустановившемся режиме фильтрации.— «Водное хозяйство». Киев, «Урожай», 1970, вып. 10.
Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1969.
О способах характеристики водоприемной способности дрен.— В сборнике научных трудов ЛатНИИГиМ: Полимеры в мелиорации и водном хозяйстве. Елгава, 1974. — Авт.: А. Д. Батурина, А. Я. Зиверт, Э. Х. Эглий, А. А. Ульянов.
Опыт строительства бестраншейного закрытого дренажа в Голодной степи. — «Гидротехника и мелиорация», 1975, № 8 — Авт.: Е. Д. Томин, В. Н. Буравцев, А. Я. Шапочкин, В. А. Духовный.
Оросительные мелиорации (Под общ. ред. С. Ф. Аверьянова). М., «Колос», 1973.
Паренчик Р. И., Сафонов В. Ф. Гидрохимические параметры для условий сазово-солончаковой зоны Джизакской и Голодной степей.— Труды САНИИРИ». Ташкент, 1976, вып. 148.
Пеньковский В. И., Постнов В. А. К задаче о промывке засоленных почв. ПМТФ, 1968, № 2.
Рекс Л. М. Влияние неравномерности начального засоления на перераспределение солей в почвенном слое. — «Гидротехника и мелиорация». 1968, № 10.
Рекс Л. М. Определение параметров дренажа на основе анализа водно-солевого режима. Использование подземных вод для орошения в комплексе с поверхностными водами. ЦБНТИ Минводхоза СССР. М., 1974.
Рекс Л. М., Кирейчева Л. В. Расчет водно-солевого режима почвогрунтов. «Хлопководство», 1976, № 1.

Решеткина Н. М., Рачинский А. А. О проблемах и принципах освоения целинных земель.— «Гидротехника и мелиорация», 1964, № 8.

Решеткина Н. М., Сойфер А. М. Аналитические методы расчета дренажа. — «Гидротехника и мелиорация», 1975, № 9.

Серебренников Ф. В. Некоторые вопросы обоснования расчета дренажа орошаемых земель. — «Труды ТИИИМСХ». Ташкент, 1973, вып. 37.

Серебренников Ф. В. Расчет параметров мелиоративного дренажа на основе прогнозирования водного и солевого режимов. Вопросы проектирования технически совершенных мелиоративных систем. — Сборник научных трудов Союзводпроекта. М., 1976, № 1 (44).

Серебренников Ф. В. Оценка влияния фильтрационных деформаций у водоприемных отверстий на приток воды в дрену. — «Сборник института «Средазгипроводхлопок», Ташкент, 1971, вып. I.

Совершенствование технологии капитальных промывок. — «Хлопководство», 1973, № 11.— Авт.: В. И. Бобченко, В. С. Макарова, В. А. Духовный, В. Ф. Ходаков.

Томин Е. Д., Шапочкин А. Я. Оптимизация технологии строительства закрытого дренажа бестраншейным способом.— «Труды ВАСХНИЛ». Прогрессивные методы строительства закрытого дренажа на орошаемых землях. М., «Колос», 1976.

Томин Е. Д., Гладков П. К. Определение тяговых сопротивлений бестраншейного дреноукладчика путем моделирования процесса резания грунта. — «Строительные и дорожные машины», 1977, № 2.

Томин Е. Д., Кузнецов В. В., Соколов В. П. Бестраншейный способ прокладки дренажа на орошаемых землях. — «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1977, № 5.

Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963.

Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. М., Изд-во МГУ, 1965.

Щуров В. И. Влияние перфораций на приток жидкости из пласта в скважину. — «Труды совещания по развитию научно-исследовательских работ в области вторичных методов добычи нефти». Баку, Изд-во АН АзССР, 1953.

Youngs E. G. Water-table heights in homogeneous soils drained by nonideal drains. Soil Science, 1974, vol. 117, No. 5.

Dileman P. J., Trafford B. D. Drainage testing. Rome, Fao, 1976.

Proceedings of 6 Congress of Irrigation and Drainage.

Gardner W. R. and others. Soil water. USSR, 1973.

Kirkham D., Schwab I. The effect of circular perforations on flow subsurface drain tubes. Part I, The jri. Agr. Eng. 32., April, 1951.

Muskat M. The offect of Casing Perforations on Well Productivity. Trans. Amer. Inst. Minmet Ehg. Vol. 151, 1943.

Houston C. E. Drainage of Irrigated Land. Division of Agricultural Sciences University of California. Circular 504, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава 1. **Горизонтальный дренаж орошаемых земель в связи с их природными условиями и его развитие в СССР** 7

Требования растений к водно-воздушному режиму почв 7
Соли и их влияние на развитие растений, засоление земель 9
Происхождение засоления и классификация солена-копления 14
Определение видов дренажа в зависимости от природных условий 20
Развитие горизонтального закрытого дренажа в нашей стране и его эффективность 26

Глава 2. **Влаго- и солеперенос в почвогрунтах и формирование оптимального мелиоративного режима на фоне дренажа** 31

Солеперенос на фоне горизонтального дренажа в эксплуатационный период 65
Водно-солевые балансы и выбор оптимального мелиоративного режима 73

Глава 3. **Расчет горизонтального дренажа** 89

Способы расчета дренажа на орошаемых землях . 89
Пример расчета дренажа 103

Глава 4. **Конструктивные особенности горизонтального дренажа** 115

Элементы коллекторно-дренажной сети и ее схемы 115
Конструкции закрытого горизонтального дренажа 120
Фильтры из несвязных материалов 125
Фильтры из искусственных волокнистых материалов 131
Водоприемная способность закрытого дренажа. Виды несовершенства 136
Гидравлический расчет горизонтального дренажа . 165

Глава 5. **Строительство закрытого горизонтального дренажа** 173

Способы строительства дренажа 173
Машины для строительства дренажа в устойчивых и подверженных обрушению грунтах 180

Машины и оборудование для строительства дренажа в условиях высокого стояния грунтовых вод 187
Методы расчета основных параметров дренажных машин 192
Организация и производство работ при строительстве дренажных систем 198

Глава 6. **Эксплуатация дренажных систем** 210

Эксплуатационная надежность системы дренажа . 210
Организация эксплуатационной службы дренажа . 224

Глава 7. **Промывки засоленных земель на фоне горизонтального дренажа** 228

Глава 8. **Эффективность систем закрытого горизонтального дренажа и пути дальнейшего ее повышения** . . 236

Указатель литературы 250