

В. А. ПОПОВ, Н. В. ОСТРОВСКИЙ

АГРОКЛИМАТОЛОГИЯ И ГИДРАВЛИКА РИСОВЫХ ЭКОСИСТЕМ



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ФГБОУ ВПО «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. А. Попов
Н. В. Островский

АГРОКЛИМАТОЛОГИЯ И ГИДРАВЛИКА
РИСОВЫХ ЭКОСИСТЕМ

Монография

Краснодар 2013

УДК 551.5:63:631.674:633.18:574
ББК 40.6
П58

Рецензенты:

А. Ч. Уджуху – доктор сельскохозяйственных наук
(Всероссийский научно-исследовательский институт риса);
Т. И. Сафронова – доктор технических наук, профессор
(Кубанский государственный аграрный университет)

Попов В. А.
П58 Агроклиматология и гидравлика рисовых экосистем/
В. А. Попов, Н. В. Островский: монография. – Краснодар: КубГАУ,
2013. – 189 с.

ISBN 978-5-94672-728-0

В монографии на основе обобщения многолетних исследований авторов изложены ранее не известные закономерности, физические и энергетические свойства экосистем, показано диалектическое единство живого растительного организма с неживой окружающей средой, доказано, что растение представляет собой сложную, энергетически самообеспеченную систему, работающую по законам гидравлики и молекулярной физики.

Впервые разработаны математические модели таких гидравлических процессов для рисовой системы, как дренирование грунтовых вод под плоской поверхностью их уровня, взаимодействие последних с поверхностными водами, и др. В современном ракурсе изложен принципиальный подход к автоматизации орошения на низовом звене рисовой системы.

Книга предназначена для бакалавров, магистров (по направлению 280100.62 «природообустройство и водопользование»), аспирантов и докторантов агроинженерного профиля, а также для практических агрономов и мелиораторов, работающих в орошаемом земледелии.

УДК 551.5:63:631.674:633.18:574
ББК 40.6

ISBN 978-5-94672-728-0
© Попов В.А., Островский Н.В., 2013
© ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗОН	
РИСОСЕЯНИЯ НА ПЛАНЕТЕ	8
1.1 Тропики и субтропики.....	8
1.2 Умеренные широты.....	13
1.3 Климаскоп риса	17
1.4 Биологическая продуктивность климата.....	18
2 СИСТЕМЫ ОРОШЕНИЯ РИСА В РАЗЛИЧНЫХ	
СТРАНАХ МИРА.....	24
2.1 Юго-Восточная Азия, Южная Америка.....	24
2.2 Западная Европа и Северная Америка.....	34
2.3 Эволюция систем орошения риса в Российской Федерации.....	37
3 ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАСТЕНИЙ И ГИДРОХИМИЯ	
ПИТАТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ	50
3.1 Внутренняя организация и структура тела растений.....	50
3.2 Явление капиллярного подъема жидкости.....	53
3.3 Вода как растворитель и средство транспорта минеральных удобрений в теле растения.....	56
3.4 Новое видение продукционного процесса растений	60
4 ГИДРАВЛИКА И ГИДРОЛОГИЯ РИСОВЫХ ЭКОСИСТЕМ.....	79
4.1 Гидрофизические явления... ..	79
4.2 Дренаживание грунтовых вод под плоской поверхностью их уровня и влияние растительности в междурье на его величину.....	95
4.3 Безнапорное движение потока по горизонтальной поверхности при ламинарном режиме.....	111
4.4 Гидродинамика взаимодействия поверхностных и грунтовых вод	115
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АГРОФИЗИЧЕСКИЕ	
ИССЛЕДОВАНИЯ	122
5.1. Связь водопотребления с испаряемостью и густотой растений.....	122
5.2 Влияние транспирации на величину дренажных потерь.....	132

5.3 Влияние ширины междурядий посевов на водопотребление и урожайность риса.....	133
5.4 Террасность рисовых чеков и ее влияние на режим грунтовых вод и урожайность риса.....	135
6 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ РИСА	146
6.1 Конструкция поливной карты ВНИИ риса	146
6.2 Новый способ орошения сопутствующих культур рисовых севооборотов.....	150
6.3 Внутречековый трубчатый и беструбчатый (кротовый) дренаж.....	154
6.4 Прерывистое затопление посевов риса по типу асимметричных треугольных импульсов.....	155
6.5 Гидравлическая автоматизация орошения риса.....	158
6.6 Экологические и агромелиоративные требования, обеспечивающие техническое совершенство системы орошения риса.....	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	179
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	180
Приложение 1.....	187
Приложение 2.....	188
Приложение 3.....	189
Приложение 4.....	189

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей аграрного сектора экономики любой страны является получение высоких рентабельных урожаев. Только в этом случае можно надеяться на успешное решение проблемы обеспечения продовольствием населения страны и на создание условий для расширенного воспроизводства, обеспечивающего устойчивый рост урожайности. Однако в этой области в последние годы появились вопросы, на которые агробиологическая наука ответить пока не может, в связи с чем трудно рассчитывать на успешное решение проблемы. Изложим сущность вопросов:

1. Рис – единственная в мире культура, полностью обеспеченная почвенной влагой, которая на большинстве континентов планеты находится в первом и главном минимуме, лимитирующем уровень урожайности [24]. В рисовом поясе (45° с. ш., 37° ю. ш.) он также полностью обеспечен и всеми другими факторами жизни – свет, тепло, воздух, минеральные удобрения. Однако, несмотря на наличие набора всех факторов жизни, урожайность риса по странам и регионам колеблется в широких пределах: если в Австралии и Египте она составляет 10–12 т/га, то в Индии, Пакистане, Таиланде и других странах Юго-Восточной Азии – 2–3 т/га [22], что в 3–4 раза ниже. Таким образом, вопрос – какой неизвестный нам объективный фактор окружающей среды определяет потенциальный уровень урожайности в регионе – остается без ответа.

2. В последние 2–3 десятилетия информационные системы и компьютерные технологии бурно вторгаются во все сферы челове-

ческой деятельности, принося большую пользу обществу, избавляя его от рутинной работы и повышая производительность труда. Однако, для самой главной отрасли на планете – растениеводства, информационные системы оказались неприменимыми, несмотря на то, что идея программирования урожаев, прообраза нынешнего «точного» земледелия, зародилась в России еще в 30-е гг. прошлого столетия, но так и осталась не реализованной. А между тем, как отмечалось на Международной аграрной конференции (Пекин, 2000), информационные технологии открывают путь к существенному совершенствованию методов принятия решений в агрономии и позволяют поднять ее на новый качественный уровень. Возникает вопрос: что мешает агроинженерам и программистам разработать алгоритм компьютерного управления ростом и развитием растений? Ответа также нет.

3. Рис по праву считается мелиорирующей культурой, так как благодаря наличию на рисовых чеках постоянного слоя воды и дренажа происходит промывка засоленных почв, которые через 2–3 года становятся высокоплодородными. В Египте, к примеру, рисовые поля размещены на исходно сильно засоленных землях, но именно здесь в настоящее время получают самые высокие в странах традиционного рисосеяния урожаи риса – 9,5–10 т/га [22]. Однако утверждение о мелиорирующей роли культуры затопляемого риса, как показала практика и специальные исследования, оказалось некорректным для массивов с близким залеганием сильноминерализованных грунтовых вод, что характерно для рисовых оросительных систем (РОС), размещенных в приморских низменно-

стях. Здесь, несмотря на наличие глубокой коллекторно-дренажной сети и орошение пресными водами, отмечено новое, ранее не известное явление – ирригационное (сезонное) засоление почв, снижающее урожайность риса в 1,5–2 раза по сравнению с рисовыми системами, находящимися вне зоны влияния прилегающих морей [38]. Механизм ирригационного засоления не изучен, методы его предупреждения не разработаны.

Целью настоящей работы является раскрытие механизма засоления почв, что позволит, во-первых, разработать методы недопущения этого явления, а во-вторых, создать фундаментальную теорию кинетики и энергетики биологических экосистем.

Авторы приносят глубокую благодарность кандидату географических наук Г.А. Галкину и кандидату технических наук С.А. Ольховому за помощь в подготовке рукописи.

1 АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗОН РИСОСЕЯНИЯ НА ПЛАНЕТЕ

1.1 Тропики и субтропики

Рис – древнейшая, жизненно важная зерновая культура орошаемого земледелия [19]. Он является единственной в мире сельскохозяйственной культурой, произрастающей на затопленной почве. Появился рис в глубокой древности – примерно за два тысячелетия до нашей эры. Во всяком случае, во время раскопок в Индии в серой расписной глине были обнаружены зерна и части растений риса, относящиеся к XI–XII вв. до н. э. [9]. Отсюда рис распространился на восток (Китай, Япония) и на запад (Персия, Месопотамия).

Родиной риса многие ученые считают страны Южной Азии – Индию, Бирму. Отличительной чертой климата этих стран является обилие тепла (положительные температуры круглый год), света и осадков (таблица 1.1, рисунок 1.1,). В таблице 1.1 представлены количественные показатели климата, характеризующие экологическую нишу родины риса.

Из таблицы видно, что минимальная температура воздуха находится в пределах 12–18 °С, максимальная 36–40 °С, количество осадков в сезон дождей – от 1267 до 2508 мм, при этом количество осадков namного (в 3–6 раза) превышает испаряемость.

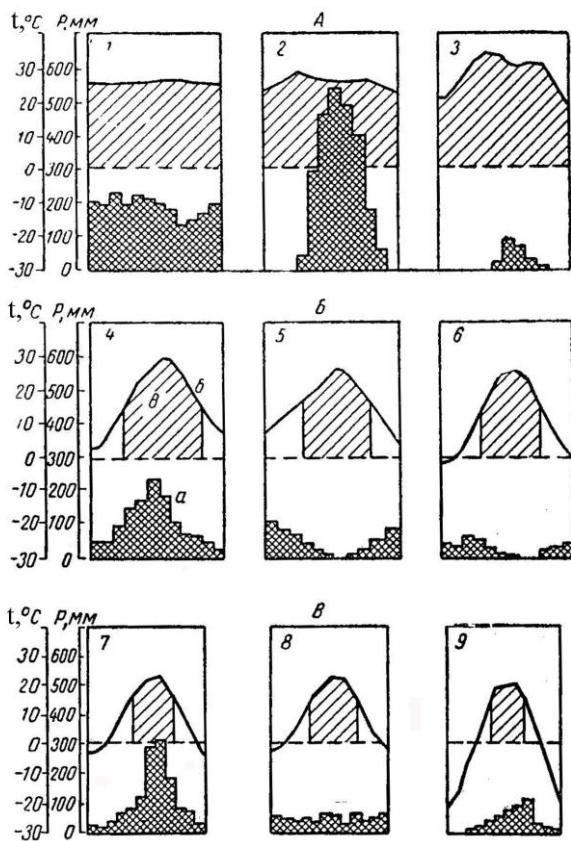
Таблица 1.1 – Климатические условия в отдельных странах Азии [14]

Страна (метеостанция)	Географическая широта	Температура воздуха, град. С			Количество осадков, мм		Число дождливых дней	Испаряемость в сезон дождей, мм
		средн.	макс.	мин.	годовое	в сезон дождей		
Бирма (Рангун)	16°46'	27,4	40,1	19,8	2649	2508	138	483
Малайзия (Куала-Лумпур)	03°07'	27,1	36,6	17,8	2476	2476	218	511
Индия (Мумбай)	18°54'	27,0	39,4	11,7	1492	1267	103	502

Этот профицит и обеспечивает наличие на чеках постоянного слоя воды, однако, как показали наши расчеты, выполненные с учетом количества осадков, бездождных периодов и испаряемости, он не велик: в начале сезона дождей 8–12 мм, в конце – 40–83 мм (рисунок 1.2).

В странах традиционного рисосеяния принята рассадная культура возделывания риса: в сухой период, за 30–50 дн до начала сезона дождей, в специальных питомниках выращивают рассаду, которую после выпадения обильных осадков высаживают в затопленные чеки. К рассадке предъявляются строгие требования [48]:

1. Растения должны быть такой высоты, чтобы их легко было выкапывать и быстро пересаживать на затопленное поле.
2. Растения должны быть хорошо выравнены и не поражены болезнями и вредителями.
3. Растения должны иметь крепкие у основания побеги, а также листья прямостоячего типа и короткие листовые влагалища.
4. Оптимальный срок высадки в фазе 6–7-го листа.



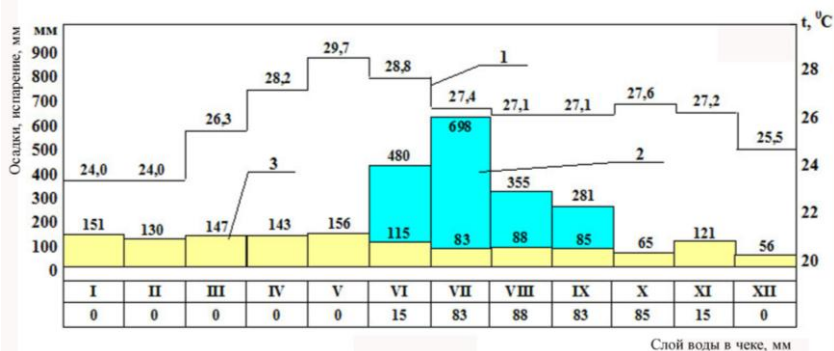
А – тропический пояс: 1 – Баликпапан (Индонезия), $1^{\circ}17'$ ю. ш. Высота над уровнем моря (м) $H = 5$; 2 – Рангун (Бирма), $16^{\circ}47'$ с. ш., $H = 13$; 3 – Тимбукту (Мали), $16^{\circ}43'$ с. ш., $H = 250$;

Б – субтропический пояс: 4 – Ханькоу (Китай), 30° с. ш., $H = 36$; 5 – Сакраменто (США), $38^{\circ}35'$ с. ш., $H = 41$; 6 – Ташкент (Узбекистан); 41° с. ш., $H = 479$;

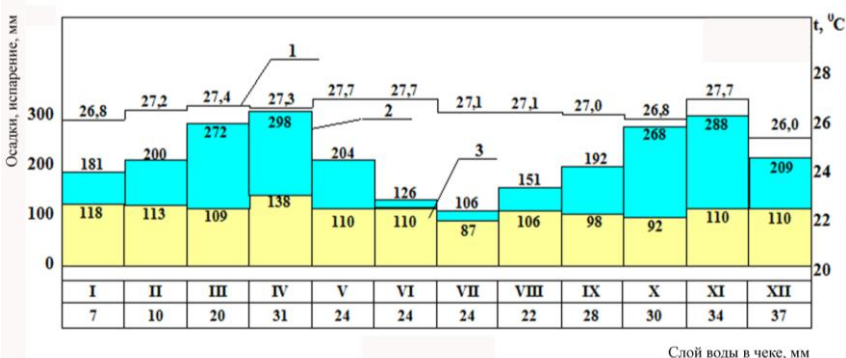
В – умеренный пояс: 7 – Вонсан (Корея), 39° с. ш., $H = 0$; 8 – Краснодар (Россия), 45° с. ш., $H = 34$; 9 – Уссурйск (Россия), 43° с. ш., $H = 25$;

а – осадки; б – среднесуточные температуры; в – возможный период вегетации риса

Рисунок 1.1 – Климатические диаграммы по районам рисосеяния [10]



А



Б

Рисунок 1.2 – Климатограмма Индии (А) и Малайзии (Б):
1 – температура воздуха, град. С; 2 – осадки, мм; 3 – испарение, мм

Посадка рассады – тяжелая работа, проходящая в крайне неблагоприятных санитарно-гигиенических условиях, невозможно даже присесть на короткое время отдохнуть, так как кругом вода и грязь. При работе квалифицированных сажальщиц на пересадку затрачивается в среднем 270 чел. ч/га [9]. Возникает резонный вопрос: почему, несмотря на изнурительный труд и неблагоприятные санитарно-гигиенические условия, крестьяне даже в такой индуст-

риальной стране, как Япония, с глубокой древности и до сих пор используют рассадный метод выращивания риса? Очевидно, что проще вместо рассады риса посеять семена в почву или воду вручную или с самолета. Но преимущество рассадного метода, по мнению В. Б. Зайцева, заключается в том, что он позволяет возделывать сорта с более длинным периодом вегетации, дающие более высокий урожай. Бесспорно, такое преимущество имеется, однако не оно определило необходимость рассадной культуры земледелия.

Можно с уверенностью предположить, что в глубокой древности крестьяне перед или в начале сезона дождей высевали семена риса, как и других зерновых культур (ячмень, пшеница), непосредственно в почву, посевы которых в сезон дождей затапливались слоем воды. Однако при таком варианте выращивания проростки риса полностью погибали уже после появления у них корешка. Причина, как теперь стало ясным, заключалась в том, что при тонком слое воды и температуре воздуха в дневные часы более 40 °С проростки из-за острого недостатка кислорода теряют жизнеспособность и погибают в первые 2–3 дня. При этом, как показали наши опыты (2008), погибали не только проростки риса, но и все виды сорной растительности. В умеренных же широтах, где рис высевают весной (апрель, май) при температурах воздуха 16–18 °С (почвы 20–22 °С) создавались благоприятные тепловые и химические (наличие кислорода в воде) условия для получения дружных и густых всходов риса. Таким образом, массовая гибель прорастающих семян в тропиках обусловила необходимость перехода к рассадной культуре. В этом случае при пересадке в возрасте 6–8 ли-

ствев у растений уже сформирована аэренхима, обеспечивающая корни кислородом, в связи с чем затопление поля является благоприятным условием.

В заключение следует заметить, что на юге Японии и в настоящее время отдельные крестьяне проводят посев риса сеялками в сухую почву. Однако затопление посевов они производят только после достижения у риса 5-го листа [47], а до этого рис растет за счет выпадения осадков, а их количество в этот период (апрель – май) на юге Японии, в районах Фукуока и Кагасима, достаточно высокое – за 3 декады апреля выпадает 124 и 209 мм соответственно. В тропиках таких условий нет.

1.2 Умеренные широты

К рисосеющим странам умеренного климата, обеспечивающим собственную продовольственную безопасность за счет искусственного орошения, относятся: США (Центральная Америка), Россия, Испания, Италия, Франция и Португалия (Западная Европа) в Северном полушарии и Австралия – в Южном. Общие представления о климате стран умеренного пояса может дать таблица 1.2.

Из анализа таблицы можно сделать вывод: успешное возделывание риса здесь возможно при двух условиях – организации искусственного орошения и использовании сортов с продолжительностью вегетационного периода не более 120–130 дн.

Таблица 1.2 – Климатические условия и урожайность риса в отдельных странах умеренного пояса [14, 22]

Показатель	Страна (метеостанция), геогр. широта				
	Австралия (Канберра), 35°17'	Италия (Рим), 41°48'	Испания (Мадрид), 40°24'	Россия (Краснодар), 45°10'	Приморье (Сантахеза), 44°45'
Ср. сут. темп-ра воздуха, град. С: годовая	13,2	15,7	13,7	11,1	8,8
вегетационного периода	17,5	22,2	20,0	20,2	17,0
Кол-во осадков, мм: годовое	582	803	432	643	1356
вегетационного периода	258	203	134	270	521
Отн. влажность воздуха в вегетац. период, %:					
утром	59	81	75	78	83
в полдень	40	56	53	66	68
Продолжитель- ность солнцестоя- ния за вегетацию, ч	1300	1392	1580	1321	1079
Урожайность, т/га	10,0	6,0	6,4	4,5	2,5

Если учесть, что физиологическая длина дня в вегетационный период риса на широтах 43–45° на 3–4 ч больше, чем в тропиках, а продолжительность солнечного сияния на 350–550 ч выше, то можно уверенно предположить, что уровень урожайности риса в умеренных широтах будет на 2–3 т/га выше.

В целом климатические условия в вегетационный период риса в умеренных широтах существенно отличаются от климата тропиков и субтропиков:

Средняя температура воздуха, град. С ... – 18–22;

Количество осадков, м 134–270;

Относительная влажность воздуха

в полуденные часы, % 40–66;

Испаряемость, мм 450–850.

Примечание – В Приморье количество осадков составляет 521 мм.

В Западной Европе и США рис как культура земледелия появился только в новой эре: первые его посевы в Италии были осуществлены в 1468 г., в США – в 1647 г., в СССР (на Кубани) – в 1930 г. В настоящее время эти страны лидируют по величине урожайности в северном полушарии, и находятся на 2-м месте, первое занимает Австралия (Южное полушарие). В отличие от стран Азии и Африки, выращивающих рис в рассадной культуре, здесь применяются посевные технологии: семена высевают в сухую почву с помощью сеялок, посевы затопливают (вода подается по оросительным каналам).

На основе многолетних наблюдений (1853–1983) за температурой воздуха на Кубани, собранных Г. А. Галкиным, определены значения среднегодовых и экстремальных параметров вегетационного периода риса (таблица 1.3), из которой видно, что размах колебаний очень широк: суммы температур изменялись от 2,4 до 3,7 тыс. градусов, продолжительность вегетационного периода – от 119 до 198 дн, а переход температуры воздуха через 15 °С происходил от 14 апреля до 22 мая.

Рис на Кубани начали возделывать относительно недавно (1930), поэтому установить связь параметров с урожайностью в средние и экстремальные годы не представлялось возможным.

Таблица 1.3 – Значения среднегодовых и экстремальных параметров вегетационного периода риса на Кубани

Показатель	Дата перехода температуры через 15 °С		Продолжительность периода, дн	Суммы температур воздуха, град. С	Температура средняя за период, град. С
	весной	осенью			
Абс. максимум	22.05	21.10	198	3726	22,2
Абс. минимум	14.04	17.09	119	2442	17,1
Среднее	05.05	27.09	145	2997	20,7

Чтобы восполнить пробел, из выборки за последние 40 лет мы установили параметры вегетационного периода в высоко-, средне- и низкоурожайные годы (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Параметры вегетационного периода риса на Кубани в годы, различные по теплообеспеченности

Год	Дата перехода температуры через 15 °С		Продолжительность периода, дн	Суммы температур, град. С	Температура средняя за период, град. С	Урожайность, т/га
	весной	осенью				
Высокоурожайный (1975)	14.04	30.09	168	3556	21,2	7,0
Средний (1983)	21.04	28.09	160	3231	20,2	6,1
Низкоурожайный (1978)	11.05	29.09	139	2760	19,9	4,6

Из таблицы видно, что низкоурожайный год отличается поздним приходом тепла весной. В связи с этим можно сделать два важных вывода: 1) при позднем наступлении тепла весной сеять целесообразно скороспелые (60 %) и среднеспелые сорта (40 %). Это позволяет убрать рис с наименьшими потерями при уборке, которые при неблагоприятной осени, как показала практика, достигают 0,8–1,2 т/га. Допускается увеличить площадь посевов средне-

спелых сортов до 70–80% с посевом до 10–12 мая при условии проведения тепломелиорирующих мероприятий: высококачественной планировки, посева семян с заделкой на глубину до 2 см, получения всходов без затопления чеков; 2) при раннем наступлении тепла сеять целесообразно среднепозднеспелые сорта (20–30%), среднеспелые (60%) и скороспелые сорта, что обеспечит высокую урожайность и снизит пик потребности в уборочной технике.

1.3 Климаскоп риса

Под термином «климаскоп» следует понимать результаты многолетних сопряженных наблюдений за развитием культуры и средней температурой воздуха по фазам вегетации. Представляется он в табличной форме, удобной для анализа (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Температура и дефицит влажности воздуха по фазам развития риса сорта Краснодарский 424 и урожайность*

Годы	Прорастание		Всходы		Кущение		Созревание		Урожайность ГСУ, т/га
	град С	мб	град С	мб	град С	мб	град С	мб	
1963	18,5	8,6	20,1	7,7	24,2	14,0	21,2	9	5,3
1964	16,9	5,2	23,9	12,1	22,8	10,3	19,4	7,6	4,6
1965	20,4	9,2	23,0	9,8	24,0	9,6	21,0	8,6	5,8
1966	17,4	5,8	20,5	5,5	26,0	9,5	20,8	8,3	5,7
1967	19,4	8,7	20,8	9,2	24,2	12,5	20,8	8,7	5,8
1968	21,4	10,3	21,9	9,6	23,1	10,3	21,1	7,9	6,5
1969	17,9	6,6	23,2	10,1	22,2	9,5	22,2	8,1	5,7
1970	15,6	4,3	19,0	6,6	23,8	11,2	18,0	6,6	5,7
1971	19,1	8,6	19,6	8,1	23,6	11,8	20,5	7,5	6,1
1972	19,0	9,2	23,0	10,8	23,2	9,6	20,1	6,3	5,4
Средн.	18,5	7,6	21,5	9,1	23,7	10,8	20,5	7,9	5,7

*Данные ГСУ и метеопоста «Рисоопытный»

Как видно из таблицы, высокоурожайными годами в исследуемый период были 1968 и 1971 гг., низкоурожайным – 1964 г.

Пониженные температуры воздуха в фазы прорастания и созревания и одновременно высокая влажность воздуха в эти же фазы явились причиной низкого (4,6 т/га) урожая в 1964 г. На основании данных таблицы определена благоприятная термоэкологическая ниша риса (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Термоэкологическая ниша риса

Фактор климата	Фазы вегетации				Урожайность, т/га
	прорастание	всходы	кущение	созревание	
Средняя температура воздуха, град С	19,1–20,4	19,6–23,9	23,1–23,6	18,0–21,1	6,1–6,5
Средний дефицит влажности, мб	8,6–10,3	8,1–9,6	10,3–11,8	7,5–7,9	

1.4 Биологическая продуктивность климата

Высокую и приоритетную роль климата в формировании урожайности подчеркнул академик Н. И. Вавилов, отметив, что климатические факторы являются определяющими в проблеме урожайности [16].

К сожалению, методики для четкой, однозначной и количественной оценки термину «биологическая продуктивность климата» (БПК) в агроклиматологической литературе не имеется, так как обобщенного показателя климата до сих пор нет, в связи с чем оценивать предлагается по отдельным ресурсам: световым, термическим и количеству влаги.

Прежде чем дать определение термину «биологическая продуктивность риса», напомним следующие факты, которые должны быть учтены, чтобы избежать вольного толкования.

1. Известному в природопользовании закону «растущего плодородия – урожайности» можно дать такое краткое определение: «Выход на более высокий уровень урожайности сельскохозяйственных культур невозможен без приложения дополнительных возрастающих затрат энергии в виде создания новых агроприемов, машин, сортов и т. д.» [47].

2. Урожайность сельскохозяйственных культур изменяется по годам в зависимости от погодных условий.

С учетом изложенного термину «биологическая продуктивность климата» можно дать следующее определение:

«Биологическая продуктивность климата – это средняя за последние 5–10 лет урожайность в регионе при использовании существующей зональной технологии возделывания».

В отечественной и зарубежной литературе известно много методов агроклиматической оценки БПК. Многие из них связаны с количеством выпадающих осадков, так как влага в почве на подавляющем большинстве континентов планеты находится в первом и главном минимуме. Поскольку затопляемый рис является единственной в мире культурой, в достатке обеспеченной водой, то мы эти методы не рассматриваем совсем. Из других методов, непосредственно не связанных с водой, приведем уравнение для оценки потенциального урожая У_п, представленное в работе [20]:

$$Y_n = \eta \cdot K_y \frac{Q}{q(1-\omega)^2}, \text{ т/га}, \quad (1.1)$$

- где Q – количество ФАР, приходящейся на 1 га посева за вегетационный период, кДж/га;
 η – доля ФАР, используемой растением на формирование биомассы;
 q – количество энергии, необходимое для образования единицы абсолютно сухой биомассы, примерно равное $4 \cdot 10^6$ кДж/т;
 K_y – содержание основной продукции в абсолютно сухой биомассе;
 ω – стандартная влажность основной продукции в долях от массы.

Уравнение корректно при оптимальной влажности почвы и оптимальной дозе удобрений. В нем η , K_y , q , ω – величины постоянные. Если записать их в виде $a = \eta K_y / q (1 - \omega)^2$, то уравнение примет вид:

$$Y_n = a \cdot Q. \quad (1.2)$$

Но из литературы по физиологии растений известно, что между урожайностью и количеством фотосинтетически активной радиации Q , а также суммарным фотосинтезом, достоверной корреляции нет [57], в связи с чем использование приведенного уравнения нецелесообразно.

В формировании урожая риса участвуют в той или иной мере все компоненты климата. Для определения связи с урожайностью каждого из них нами проведены специальные статистические исследования: выбран ряд стран, охватывающих экологический пояс

(нишу) риса, и для каждого из них установили среднюю величину компонентов климата, а также среднюю урожайность риса в регионе (таблица 1.7).

Как видно из таблицы, наибольший коэффициент детерминации (доля вклада фактора), т. е. наиболее тесная корреляция с урожайностью, оказался у показателя испаряемости; с остальными связь несущественна.

Таким образом, приходим к выводу: обобщенным показателем климата для оценки БПК следует принять испаряемость E_n , под которой понимается потенциальное количество воды, которое может испариться с открытой водной поверхности за вегетационный период, мм.

Уравнение связи с урожайностью риса представляется в виде [35]:

$$y = \alpha(E_n - E_0), \text{ т/га}, \quad (1.3)$$

где α – показатель биологической эффективности испаряемости, зависящий от содержания в почве удобрений и в среднем по странам мира равный 0,01 т/га·мм;

E_0 – порог испаряемости, ниже которого рис не формирует урожая зерна совсем. В наших исследованиях $E_0 = 100$ мм.

Величину потенциальной испаряемости E_n можно определить по одной из следующих формул [59]:

Таблица 1.7 – Климатические факторы в вегетационный период и урожайность риса в странах с различной отдаленностью от экватора [22]

Страна (метеостанция)	Географическая широта	Температура воздуха [2], град С		Относит. влажность воздуха [2], %	Скорость ветра, м/с	Суммарная ФАР, млрд ккал-га [5]	Испаряемость, мм	Уровень урожайности, т/га [22]
		средняя	колебания в период					
Индонезия (Джакарта)	06°11' с.ш.	26,6	26–27	73	0,9	7,5	518	4–5
Индия (Бомбей)	18°51' с.ш.	28,0	26–30	79	3,0	6,5	474	3–4
Австралия (Перт)	31°57' ю.ш.	21,9	19–24	49	4,3	4,0	809	9–10
США (Вашингтон)	38°51' с.ш.	22,7	19–26	64	3,6	3,2	590	7–8
Испания (Мадрид)	40°24' с.ш.	20,8	16–24	53	2,4	3,2	710	8–9
Россия (Краснодар)	45°18' с.ш.	20,3	18–24	66	2,6	3,2	502	4–5
Коэффициент детерминации с урожайностью		0,42	–	0,75	0,35	0,22	0,93	–

$$E_{\pi} = 0,14 (e_{\pi} - e_{200})(1 + 0,72V_{200}), \text{ мм/сут} \quad (1.4)$$

$$E_{\pi} = 0,0018(25 + t)^2 (100 - e), \text{ мм/мес} \quad (1.5)$$

где e_{π} – упругость водяных паров, насыщающих пространство при температуре поверхности воды, мб;
 e_{200} – влажность воздуха на высоте 200 см, мб;
 V_{200} – скорость ветра на высоте 200 см, м/с;
 e – относительная влажность воздуха, %;
 t – среднемесячная температура воздуха, град С.

Недостатком уравнения (1.5) является отсутствие в нем учета влияния на величину испаряемости ветра. Это недостаток отсутствует в уравнении (1.4), в нем учтены почти все факторы климата: температура воздуха и воды, влажность воздуха на различной высоте и сила ветра. Это дает право считать испаряемость обобщенным показателем климата, который, как показано в уравнении (1.3), коррелятивно связан с величиной урожайности риса в зерне.

Уравнение (1.3) линейное, оно корректно при $100 \leq E_{\pi} \leq 900$ мм. Как показали наши исследования, при $E_{\pi} > 900$ мм урожайность снижается, так как корневая система растений в этом случае не в состоянии обеспечивать растение водой: уровень ее в устьях капилляров снижается, в связи с чем клетки на кончиках листьев начинают необратимо отмирать.

2 СИСТЕМЫ ОРОШЕНИЯ РИСА В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ МИРА

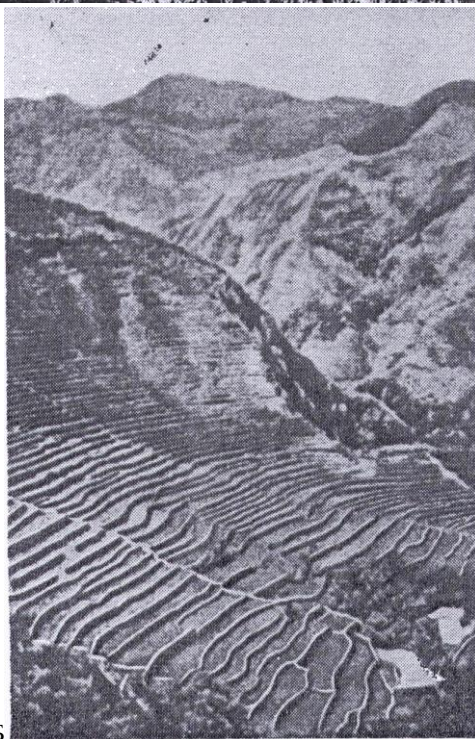
2.1 Юго-Восточная Азия, Южная Америка

Если бы не было риса, то в большинстве стран традиционного рисосеяния, где количество осадков в сезон дождей значительно превышает испаряемость, пришлось бы строить не оросительные, а осушительные системы с устройством глубоких дренажных осушительных каналов, которые жизненно необходимы для возделывания сельскохозяйственных культур при избыточном увлажнении. В глубокой древности искусственное осушение было неосуществимо.

Культура затопляемого риса позволяет избежать необходимости осушения и весьма эффективно использовать природные климатические и земельные ресурсы по следующей причине. Поскольку рис по своей природе – культура мелких пересыхающих водоемов, то при избыточном количестве осадков любой ландшафт можно превратить путем обвалования горизонтальных участков земли в огромное множество малых водоемов с колебаниями отметок внутри них ± 5 см и перепадом между соседними в пределах не более 6–8 см. Такие нановодоемы получили название «рисовые чеки», а их совокупность – «туземные рисовые системы» (рисунок 2.1). Они позволяют избежать поверхностного стока и, как следствие, эрозии почвы, рационально использовать водные и земельные ресурсы региона, равномерно распределяя выпадающие осадки по всей поверхности земли.



А



Б

А - слабоуклонные равнины; Б - склоны гор
Рисунок 2.1 – Туземные рисовые системы (Филиппины)

Как видно из рисунка 2.1, рисовые чеки построены по извилистым горизонталям местности. На равнинах и в долинах рек, где микро-рельеф представляет собой хаотическое (случайное) сочетание мелких повышений и понижений, чеки строят не в виде узких полос, а в виде многоугольников, однако и в этом случае перепад отметок между ними не должен превышать 6–8 см.

В странах, где в сухой период выпадает незначительное количество осадков (в Индии, например, всего 225 мм) применяют искусственное орошение путем забора воды из рек и строительства водопроводящих оросительных каналов и гидротехнических сооружений на них. Осушительную (водоотводящую) сеть на таких системах, как правило, не строят: осушение в уборочный период осуществляется за счет испарения и транспирации. В отдельных случаях уборку риса осуществляют по воде вручную с выносом снопов на прилегающие валики, дамбы и дороги. Рассмотрим системы орошения риса в некоторых странах.

Во многих странах Юго-Восточной Азии преобладает горный рельеф, посевы риса на котором размещают в основном в долинах горных рек. Международным институтом риса (IRRI) разработаны основные критерии использования таких речных долин для максимального вовлечения всех их элементов в землепользование (рисунок 2.2). В частности, на верхних и наклонных плато рекомендуется возделывать суходольный (неорошаемый) рис, источником влагообеспеченности которого служат осадки. На низменной равнине выращивают орошаемый рис с использованием для орошения воды из реки. В ее пойме размещают затопляемый, в том числе и глубо-

ководный рис. Источником водоснабжения для них служат частые ливневые паводки, затапливающие пойму. Чтобы вода после окончания очередного паводка не возвращалась назад, в русло реки, - ее берега обваловывают с устройством в валах регулируемых прорезей.

Как видно из рисунка 2.2, уровни грунтовых вод под верхним (наклонным) и нижним плато находятся глубоко под поверхностью земли, и только в пойме, в отдельных понижениях, они могут выклиниваться на дневную поверхность.

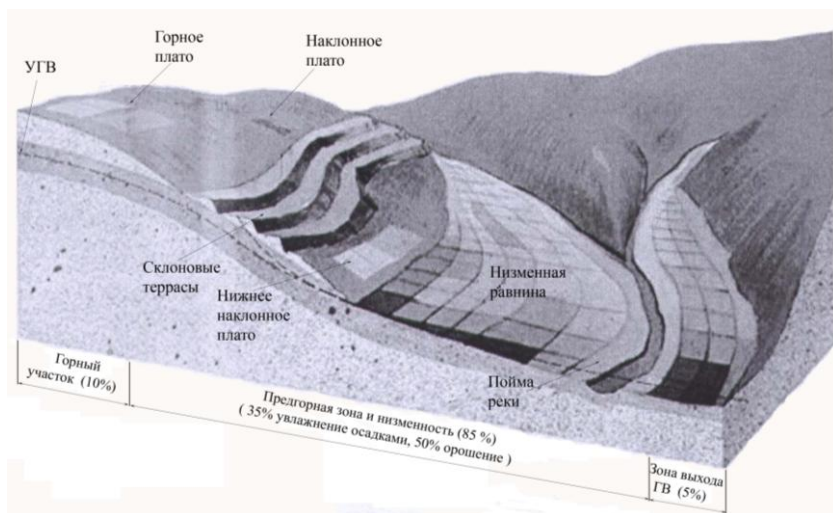


Рисунок 2.2 – Типовой рельеф речной долины с размещением на ее элементах посевов риса [60]

На Кубе существует три конструкции рисовых систем: традиционные, полуинженерные и инженерные (таблица 2.1).

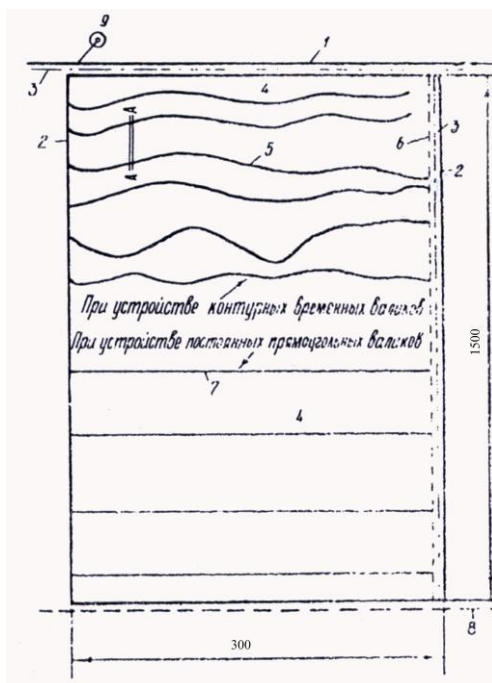
Таблица 2.1 – Распределение рисовых оросительных систем по провинциям республики Куба (га) [2]

Провинция	Рисовые системы			Всего
	традиционные	полуинженерные	инженерные	
Пинлар дель Рио	28824	12971	–	41975
Гавана	2680	570	–	3250
Матансас	–	10720	–	10720
Сантиспиритус	5360	24235	354	29949
Гранма	39154	26666	–	65820
Камагуэй	7638	15235	–	22941
Итого, га	83656	90819	354	174475
%	48,8	51,0	0,2	100

Традиционные характеризуются отсутствием спланированных чеков, постоянных каналов и гидротехнических сооружений. Такие системы характеризуются временными валиками и примитивными сооружениями на них. Использование мощной сельскохозяйственной техники на таких системах невозможно.

На полуинженерных системах постоянными элементами являются главные распределительные оросительные каналы, картвые же оросители и сбросы остаются временными. Отсыпанные из рыхлого грунта, их дамбы часто разрушаются потоком воды, что требует постоянного надзора за их состоянием. Прорывы в валиках и дамбах восстанавливают вручную.

Поливную карту длиной стороной располагают по направлению основного уклона: длина карт 1200–1500 м, ширина – 300 м (рисунок 2.3).



1 – распределитель; 2 – ороситель; 3 – дорога; 4 – чек; 5 – контурный временный валик; 6 - картовый сброс; 7 – дорога; 8 – постоянный прямоугольный валик; 9 – чек

Рисунок 2.3 – Рисовая полуинженерная карта [2]

Инженерные системы строят с постоянными каналами, валиками и гидротехническими сооружениями на них. При проектировании за образец на Кубе принята карта краснодарского типа (ККТ). Площадь чеков ККТ находится в пределах 2–3 га. Планировка плоскости чека осуществляется по сухой почве с помощью скрепера и различного рода планировщиков с точностью ± 5 см. На экспериментальном участке опытной рисовой станции площадью

145 га урожайность риса на таких картах повысилась с 3,5–4,0 т/га до 6–9 т/га.

В последние годы планировку стали проводить и по воде с использованием специального планировщика – флотанивелядора. Это прицепное орудие, состоящее из следующих главных элементов: двух металлических брусьев-полозов и ножа, который является рабочим органом. Брусья соединяются трубами. Флотанивелядор работает в агрегате с трактором САМЭ мощностью 85 л.с. Рабочий орган управляется через гидравлическую систему трактора. Срезка грунта производится спущенным ножом, на насыпях он поднимается.

Принята следующая технология планировки: перед началом работ поверхность чека разрыхляется, на нем устраивают чековые валики, производят очистку русла оросительных и водоотводящих каналов, а затем затапливают чек слоем воды 12–15 см. После впитывания части слоя воды в почву оставшуюся часть понижают до уровня, при котором половина площади чека осушена.

Трактор с флотанивелядором, двигаясь от возвышений к пониженным местам, выравнивает почву до тех пор, пока вся площадь будет покрыта водой. Взмученной воде дают отстояться и затем сеют рис в воду.

В провинции Гавана при планировке по воде на карте общей площадью 53 га были получены следующие данные: объем планировки в среднем 450 м³/га; средняя площадь чеков – 1 га; коэффициент земельного использования (КЗИ) – 0,89; производительность флотанивелядора – 0,83 га/ч; урожайность риса – 4,5 т/га.

Источниками водоснабжения посевов риса на Кубе являются:

– реки с открытыми водозаборами (самотечное орошение) или с машинным подъемом воды из них насосами. С помощью речного водозабора поливается 36 % рисовых оросительных систем;

– водохранилища сезонного регулирования на малых реках (46 %);

– грунтовые воды (18 %).

Режим орошения риса имеет важное значение как в отношении получения высоких урожаев, так и в отношении рационального использования водных ресурсов. Национальным институтом риса Кубы для разработки оптимального, экономически выгодного режима орошения проведены многолетние исследования отдельных частей режима орошения. Приведем их результаты, так как методология подхода оригинальная и может быть полезной для России.

Прежде всего было установлено, что экологически обоснованным сроком повторного затопления чеков после наклеивания посеянных семян является 15–20-й день: за пределами этого срока создаются благоприятные условия для развития сорняков, которые уже не могут быть подавлены слоем воды. Урожайность резко снижается (таблица 2.2).

Рациональная толщина слоя воды в период вегетации определена следующей: 5 см – от всходов до конца кущения, 10 см – в оставшийся период вегетации. Прибавка урожайности 10–20 ц/га (таблица 2.3).

Таблица 2.2 – Влияние сроков повторного затопления на развитие риса и сорняков (опыт полевой, Гавана, 1981) [26]

Сроки затопления, сут.	Густота всходов, раст./м ²	Кол-во сухого в-ва через 20 дн после получения всходов, г	Урожайность, ц/га	
			рис	сорняки
10	300/355	0,80/0,62	74/58	12,1
15	303/325	0,77/0,61	83/57	10,3
20	301/320	0,70/0,62	86/57	10,0
25	336/326	0,78/0,62	73/56	11,5
30	239/378	0,78/0,69	79/42	34,0

Примечание: числитель – сорт Х-104, знаменатель – С-1

Установлено также, что в фазу 2-го листа рис выдерживал затопление слоем воды на 5 см выше растений в течение 48 ч. Дальнейшее перетопление приводило к частичной, а после 6 сут – полной гибели растений.

Таблица 2.3 – Влияние величины слоя воды на урожайность риса (вегетационный опыт, 1982 г.)

Слой воды, см	Количество растений к уборке, шт.		Урожайность, г/сосуд	
	Х-104	С-1	Х-104	С-1
5	16	29	37,3	79,1
10	16	25	42,4	77,5
15	14	20	30,8	56,0
5-10	18	22	43,7	73,2

Очень важное для экономии оросительной воды свойство риса установлено при изучении влияния сроков предуборочного осушения посевов: оптимальный срок начала осушения поля «выход в трубку – начало выметывания» (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Влияние сроков прекращения подачи воды на урожайность риса, ц/га

Срок начала осушения	Сорт риса	
	X-104	C-1
Без сброса до полной спелости (контроль)	76	71
Кушение	70	50
Дифференциация конуса нарастания: начало конец	77	48
	86	57
Выход в трубку	87	68
Выметывание: начало конец	81	76
	73	–

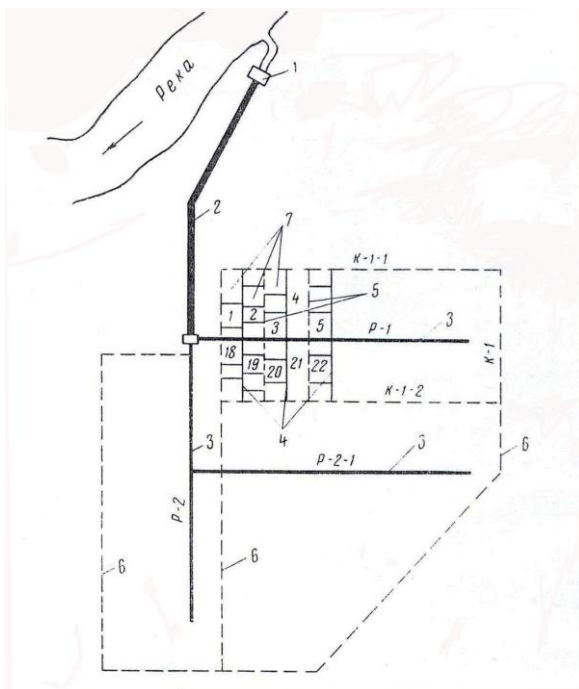
Примечание. Климат Кубы отличается высокой влажностью воздуха и часто выпадающими осадками. Так, например, в сентябре и октябре выпадает соответственно 144 и 178 мм осадков, в то время как на Кубани (м/с Славянска-на-Кубани) – 38 и 45 мм. По этой причине в условиях Кубани для определения сроков прекращения подачи воды необходимы специальные исследования.

На основе анализа приведенных данных (таблицы 2.1–2.4) разработан рациональный режим орошения: первоначальное затопление посевов сроком на 1 сут – поверхностное осушение поля на период получения всходов – повторное затопление посевов слоем 5–10 см через 20–25 дн после появления всходов – поддержание слоя воды до фазы выхода в трубку – начало выметывания.

Как показали исследования Национального института риса Кубы, при таком режиме орошения экономия воды составляет 3–5 тыс. м³/га по сравнению с постоянным затоплением до полной спелости зерна.

2.2 Западная Европа и Северная Америка

В странах умеренных широт, где количество осадков в вегетационный период риса не превышает 200–300 мм, орошение риса осуществляют искусственным путем, забирая воду из рек, озер, водохранилищ и других источников водоснабжения. Для подачи воды на рисовые поля строят специализированные рисовые оросительные системы (РОС). От обычных систем они отличаются тем, что, во-первых, оригинальный ландшафт коренным образом преобразовывается в огромное множество горизонтально спланированных площадок (чеков), ограниченных со всех сторон земляными валиками и дамбами, и оснащенных мелкими гидротехническими сооружениями для подачи воды на них и отвода избыточной воды с посевов. Во-вторых, в связи с тем, что орошение проводится методом затопления, появляется необходимость в устройстве коллекторно-дренажной сети для отвода технологических сбросов и осушения чеков в межполивной период с понижением уровня грунтовых вод до нормы осушения (1,3–1,5 м). Стоимость строительства таких систем возрастает в 2–3 раза по сравнению с обычными. В Восточной Европе (Украина, Болгария, Венгрия) построены рисовые системы инженерного типа (рисунок 2.4), в США и Западной Европе – полуинженерные с временными чековыми валиками.



1 – головное сооружение; 2 – магистральный канал; 3 – распределители;
 4 – картовые оросители; 5 – картовые сбросы; 6 – коллекторы; 7 – поливные карты
 с чеками

Рисунок 2.4 – Схема рисовой оросительной системы, применяемая в странах западной Европы и Америки

В США и Западной Европе поливная карта разбивается на чеки с валиками контурного типа, т. е. устраиваемыми по горизонталям местности. В плане такие валики криволинейны. Хотя такое расположение контурных валиков сокращает объемы планировочных работ внутри чеков, они затрудняют работу механизмов, что ведет к увеличению затрат труда при подготовке почвы, посеве и уборке урожая. Во избежание излишних затрат в последние годы в отдельных штатах рисовые чеки стали строить прямоугольными.

Это позволяет, как показал опыт, повысить эффективность использования техники и коэффициент использования земли, при этом снижаются потери урожая при уборке комбайном [15].

В штате Калифорния межчеховые валики сооружаются с помощью специального валикообразователя. Для его работы на тяжелых почвах используют 2–3 трактора, валики возводятся за один проход осенью, чтобы к весне грунт уплотнился до высоты 40–50 см.

В отдельных штатах США и странах Западной Европы кроме земляных устраивают низкие валики (30 см) с покрытием их полиэтиленовой пленкой толщиной 0,1 см.

Контурные земляные валики, как правило, сезонного типа: их ежегодно разрушают до начала подготовки почвы к посеву и проведения эксплуатационной планировки. В этом случае вся поливная карта обрабатывается (пахота, посев) как единое поле. После посева риса валики возводят вновь.

Для подачи воды на посевы риса устраивают оросительные каналы в земляном русле. В Калифорнии в последние годы часть крупных каналов стали устраивать в бетонной одежде с целью снижения потерь на фильтрацию и подавления прорастания сорной растительности.

Расход воды для орошения риса зависит от количества выпадающих осадков, водопроницаемости почв и режима орошения. В южных штатах, где в вегетационный период выпадает значительное количество осадков, он составляет 6–12 тыс. м³/га, в Калифорнии, где сухой и жаркий климат – 25 тыс. м³/га.

2.3 Эволюция систем орошения риса в Российской Федерации

Как уже упоминалось, рис – одна из древнейших жизненно важных сельскохозяйственных культур, возделываемая сотни и даже тысячи лет в 118 странах мира. В России рис выращивают менее 100 лет (80), для ее народов он до сих пор является экзотической культурой. Первые производственные посевы риса (57 га), завезенного из Северной Кореи, были проведены в 1930 г. на Кубани, ставшей впоследствии научным и координационным центром рисоводства в СССР. Пионерные опыты показали, что с климатической точки зрения возделывание риса на юге России возможно и перспективно при условии учета следующих гидрогеологических и социальных особенностей, аналогов которых в мире не нашлось:

1. Под рис на Кубани отведены не высокоплодородные земли в долинах рек с глубоким залеганием слабоминерализованных грунтовых вод, как, например, в долине р. Сакраменто (США) и р. По (Италия), а бросовые, непригодные к сельскохозяйственному использованию, заболоченные земли (так называемые плавни) в дельте р. Кубани с близким (0–1,5 м) залеганием сильноминерализованных (16–18 г/л) грунтовых вод, выходящих в понижения на дневную поверхность в виде лиманов (рисунок 2.5). В этих условиях без устройства глубокой коллекторно-дренажной сети с механическим подъемом сточных вод насосными станциями для понижения уровня грунтовых вод до нормы осушения (1,3–1,5 м), освоение плавней практически неосуществимо.

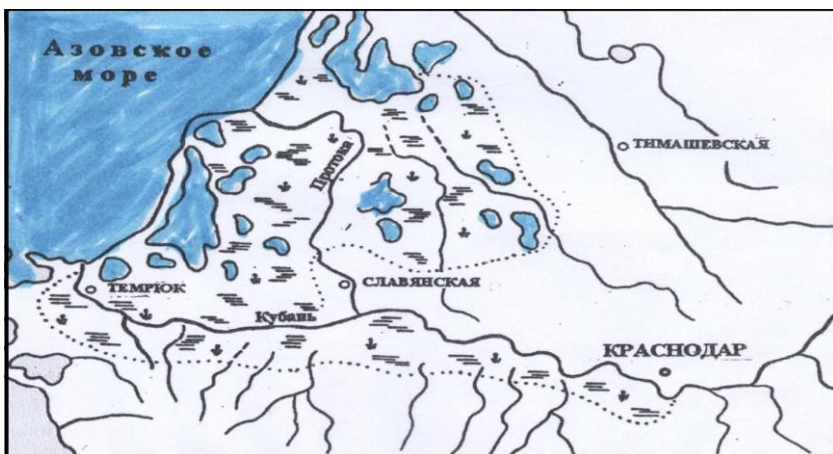


Рисунок 2.5 – Схема низовой Кубани до строительства рисового водохозяйственного комплекса (темные пятна – лиманы)

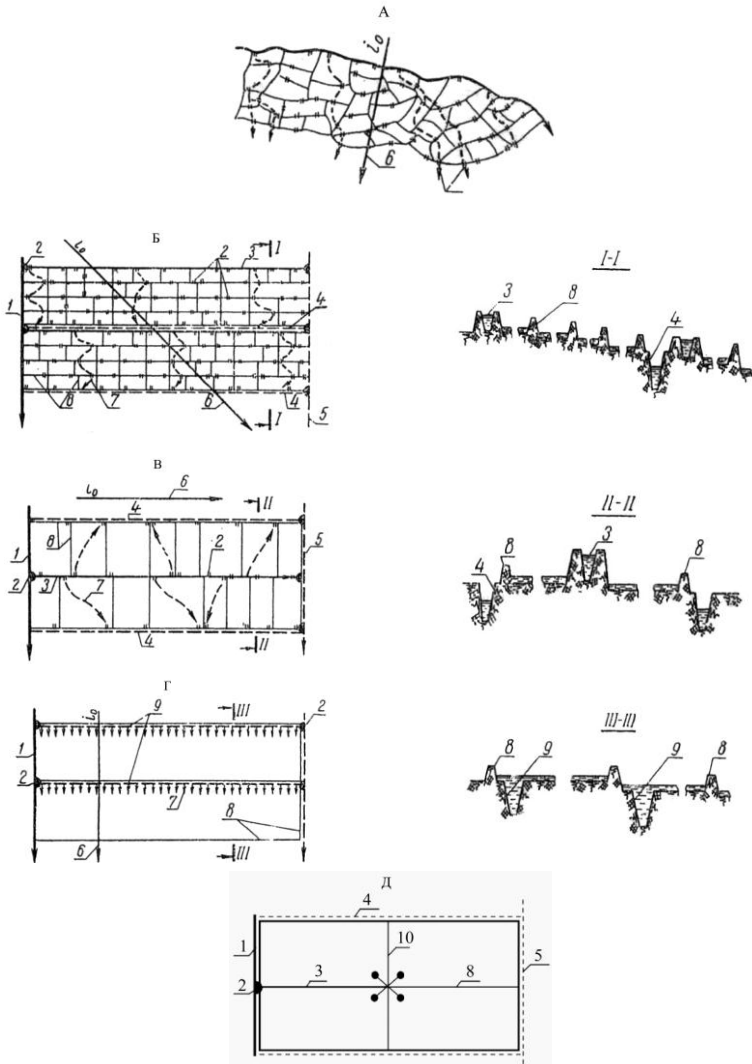
2. Мезорельеф в долинах рек, как известно, существенно отличается от мезорельефа в их дельтах: здесь он представляет собой не слаборасчлененную равнину, а сильнорасчлененную аккумулятивную низменность с крупноячеистым рельефом понижений и приподнятыми руслами рукавов вдоль многочисленных протоков, **протичек**, ериков и других элементов мелкой гидрографической сети. На таком рельефе трудно построить рисовые чеки по горизонталям слабоуклонной местности, что практикуется во всех странах мира: здесь без преобразования природного ландшафта во множество горизонтально спланированных площадок (чеков) строительство рисовых систем затруднено.

3. В 1929–1933 гг. в сельском хозяйстве России произошли коренные социальные преобразования: образовывались коллективные хозяйства (колхозы), в которых мелкие крестьянские наделы объединялись в крупные поля, обработка которых требовала примене-

ния высокопроизводительной сельскохозяйственной техники, обеспечивающей снижение затрат ручного труда и повышение рентабельности производства. Коллективизация и государственное планирование позволяли создавать не фрагментарные участки рисовых полей, а крупные (100–200 тыс. га) рисовые водохозяйственные комплексы.

Описанные особые условия привели к тому, что Россия вынуждена была разработать свой собственный путь развития систем орошения риса. Изложим вкратце сложную историю этого развития, в которой были и успехи и просчеты, что неизбежно при решении проблем по методу проб и ошибок.

Конструкции рисовых оросительных систем. В 1930 г. при Управлении по мелиорации Приазовских, Закубанских и Адыгейских плавней (Плавстрой), созданном в 1929 г. по решению Совета Труда и Оборона было организовано проектное бюро. Его научными руководителями которого стали профессора П. А. Витте и Б. А. Шумаков, которые срочно разработали первые технические условия по проектированию РОС. Согласно техническим условиям, поливные карты представляли собой прямоугольные участки земли, площадью 12–14 га с односторонним командованием оросителей [9]. По причине отсутствия мелиоративной техники (экскаваторы, скреперы) и выполнения большей части земляных работ вручную или на конной тяге, карты разбивались на множество мелких чеков прямоугольной формы площадью 0,1–0,3 га (рисунок 2.6), полив осуществляли по цепочке чеков путем последовательного перелива воды из уже затопленных в ожидающие своей очереди незатопленные.



А – неинженерная система; Б – первая инженерная система; В – карты краснодарского типа; Г – карты-чеки с широким фронтом залива и сброса; Д – карты системы «кубанская»; 1 – групповой распределитель; 2 – водовыпускные сооружения; 3 – ороситель; 4 – картвый сбросной канал; 5 – групповой сбросной канал; 6 – направление уклона местности; 7 – направление движения воды; 8 – чековые валики; 9 – сброс-ороситель; 10 – дорога

Рисунок 2.6 – Эволюция конструкций поливных рисовых карт

Опыт эксплуатации карт выявил серьезные недостатки: 1) первоначальное затопление поливной карты и ее предуборочное осушение осуществлялось крайне медленно (по 8–12 дн), что укорачивало вегетационный период, приводило к заболачиванию нижних ярусов чеков, на которых появлялось огромное количество сорной растительности; 2) на картах почти все работы (сев, уборка, внесение удобрений, прополка) могли выполняться только вручную; 3) для полива, ухода за посевами и прополки требовалось огромное количество поливальщиков, которых на территории малонаселенных плавней не хватало, а привлечение горожан на сезонные работы было взаимно невыгодным; 4) близкое расположение друг к другу картых оросителей и дренажных сбросных каналов приводило к потерям воды из-за сильной фильтрации с оплыванием прилегающего откоса. Урожайность на таких системах не превышала 2 т/га. С учетом изложенных недостатков и ожидаемой поставки мелиоративной техники из США поливная карта была срочно модернизирована: вместо 48–50 мелких чеков стали строить более крупные (1,5–2,5 га), при этом они были сквозными от оросителя до дренажно-сбросного канала, что обеспечивало автономность полива и осушения каждой из них.

Модернизация облегчила труд поливальщиков и позволила создать и поддерживать благоприятный для риса водный режим чеков, дала возможность широкой механизации сельскохозяйственных работ и повышения коэффициента земельного использования до 0,65. Урожайность возросла до 2,5–3,0 т/га. Модернизированные поливные карты получили название «карт краснодарского

типа». Их конструкция продолжала постоянно совершенствоваться: в частности, площадь чеков к 1965 г. возросла до 3–4 га [26], картовые оросители были разобщены с картовыми дренами, при этом оросители устраивали в уплотненной насыпи для снижения фильтрационных потерь [9]. Модернизация завершилась к 1974 г. и ее венцом стала разработанная институтом «Кубаньгипроводхоз» карта системы «кубанская» (КСК) [48]: от ККТ она отличалась тем, что независимо от мезо- и микрорельефа все карты состояли из четырех равновеликих чеков площадью 6 га, полевые дороги устраивали не по дамбам участковых коллекторов, а по линии раздела чеков, оросители были тупиковыми, доходящими до вторых чеков. В тупиковой части оросителя устраивали 4 водовыпуска из оросителя в чек (рисунок 2.4), что облегчало работу поливальщика, так как все водовыпуски размещались вдоль полевой дороги, а это давало возможность использовать малый транспорт (велосипед, мотороллер).

Плановая схема КСК имела важное значение для унификации, стандартизации и сокращения типоразмеров гидротехнических сооружений. Однако эталоном высокопродуктивной сельскохозяйственной устойчивой экосистемы она стала только после того, как ученые ВНИИ риса доработали схему мелиоративными атрибутами и механизмом регулирования режима поверхностных и грунтовых вод. Именно эти доработки обеспечили новые свойства экосистемы и рост урожаев риса. Изложим вкратце суть главных из них.

1. С увеличением площади рисовых чеков возросли до 1000 м³/га объемы планировочных работ на них [26] (таблица 2.5), при этом срезки на повышенных частях микрорельефа достигали 1 м.

Таблица 2.5 – Динамика объемов планировочных работ на рисовых системах Кубани (м³)

Система	Годы строительства	Площадь, тыс. га	Средняя площадь чеков, га	Средний объем планировочных работ, м ³ /га
Тиховская	1930–1944	3,5	0,17	75
Кубанская	1944–1951	25,1	1,1	380
Афипская	1952–1961	7,5	2,6	515
Петровско-Анастасиевская	1953–1965	33,4	2,8	620
Марьяно-Чебургольская	1966–1969	16,5	4,2	648
Черноерковская	1968–1985	21,5	5,9	808

В сложившейся гипсометрической обстановке при выравнивании чеков под горизонтальную плоскость происходило, по сути дела, «оскальпирование» почвы: на повышенных частях обнажался малоплодородный глинистый горизонт, на пониженных происходило смешивание гумусового слоя с глиной.

На таких чеках получать высокий урожай даже при внесении повышенных доз минеральных удобрений и навоза не удавалось [26] – недобор составлял 14–34 % от потенциально возможного уровня. При этом восстановление потенциального плодородия обнаженной почвы происходило крайне медленно – 10–25 лет и более.

Для устранения изложенной негативной ситуации учеными ВНИИ риса в 1963 г. был предложен способ планировки с сохранением плодородия почв, получивший название «кулисная планиров-

ка». Суть его заключается в том [26], что перед началом работ устраивали узкие (10 м) маячные полосы, в которые сгребали пахотный слой (20 см) со всей площади чека (рисунок 2.7). Поверхность, с которой снят пахотный слой, планировали под горизонтальную плоскость (рисунок 2.8), после чего срезанный плодородный слой возвращали на место. Новый способ показал хорошие результаты: коэффициент плодородия $K_{пл}$ в среднем составлял 0,95 (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Степень сохранения пахотного слоя при планировке чеков маячно-полосовым способом (Черноерковская оросительная рисовая система, 1968–1969 гг.)

Номер карты и чека	Площадь, га	Объем буртования, м ³	Количество точек (%) с толщиной плодородного слоя, см					$K_{пл}$
			10–14	15–16	17–19	20–21	22–25	
27-1	6,97	6960	2,3	9,7	24,4	47,1	16,5	0,92
36-2	4,80	3820	3,6	28,5	41,6	22,0	4,3	0,91
5-3	4,46	3200	1,2	8,5	29,7	36,6	24,0	0,99
7-2	4,13	2560	2,0	10,2	31,5	37,9	18,4	0,98
11-1	3,75	2480	3,4	26,5	40,4	22,1	7,8	0,95

2. С увеличением площади чеков возросли также и перепады отметок между ними (террасность чеков), в связи с чем после затопления посевов смежные чеки вступали в гидродинамическое взаимодействие – грунтовые воды из верхнего поступали в нижний, принося в его пахотный слой растворенные соли и более низкую (на 3–5°) температуру. Урожайность риса на нижележащем чеке в полосе шириной 20–30 м снижалась на 30–40 %, а на картах с обратным уклоном – на всей его площади [11].

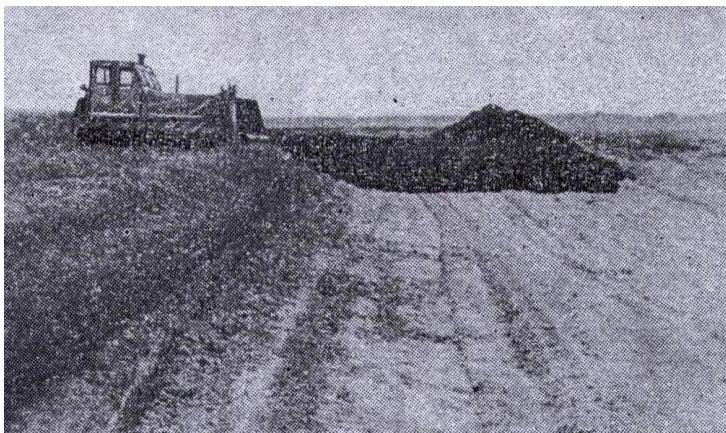


Рисунок 2.7 – Буртование пахотного слоя бульдозером Д-271

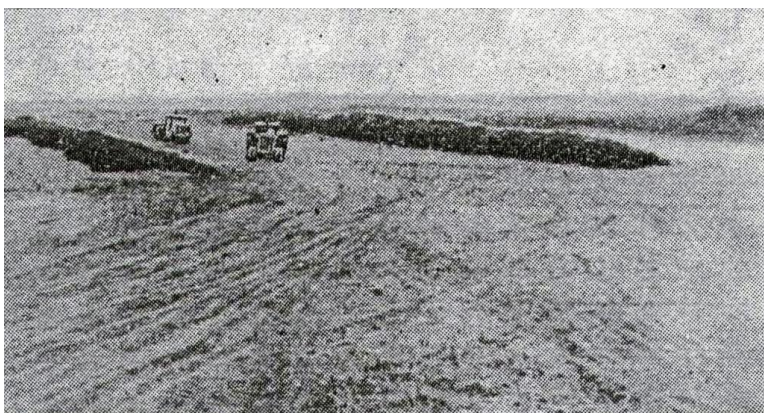


Рисунок 2.8 – Планировка чека скреперами

Для смягчения отрицательных явлений ВНИИ риса был разработан отраслевой стандарт (ОСТ 33.6 – 73), запрещающий проектным институтам проектировать системы с террасностью чеков бо-

лее 40 см. На ККТ это достигалось за счет уменьшения площади чеков, а для КСК рекомендовано устройство отсечного дренажа под разделительным валиком (авторское свидетельство на изобретение СССР № 1634182 [62]).

Орошение риса. Ученым-рисоводам России потребовалось немало времени и сил, чтобы определить экономически выгодный способ орошения риса. Рассматривалось два варианта: затопление по чекам и периодическое увлажнение, не требующее строительства дорогостоящих рисовых оросительных систем и горизонтально спланированных чеков. Сторонники второго способа, получившие название «суходольщики», представляли свои аргументы, «затопленцы» – свои. Окончательную точку в споре поставили Н. П. Красноок и Т. К. Черепяхин. В 40-е гг. прошлого столетия они независимо друг от друга провели исследования по установлению эффективности обоих способов [33].

Проанализировав результаты их исследований, можно сделать следующие выводы: 1) все сорта риса, в том числе и маловодотребовательные (суходольные), наивысший урожай формируют при затоплении – в среднем на 41,5 % выше, чем при увлажнении; 2) из всех способов увлажнительных поливов (по полосам, бороздам и при дождевании) наиболее продуктивным оказалось дождевание, но оно было и самым дорогим; 3) затраты ручного труда на поливе и при прополке огромного количества постоянно появляющихся сорняков увеличились по сравнению с затоплением более чем в 20 раз.

Перечисленные обстоятельства в условиях дефицита рабочей силы и высоких материальных и трудовых затрат привели к категорическому отказу от периодического увлажнения, в связи с чем дальнейшие исследования в этом направлении были прекращены и был взят курс на строительство в южных регионах России инженерных рисовых систем с единственным способом орошения – затоплением по крупным (4-6 га) хорошо спланированным рисовым чекам.

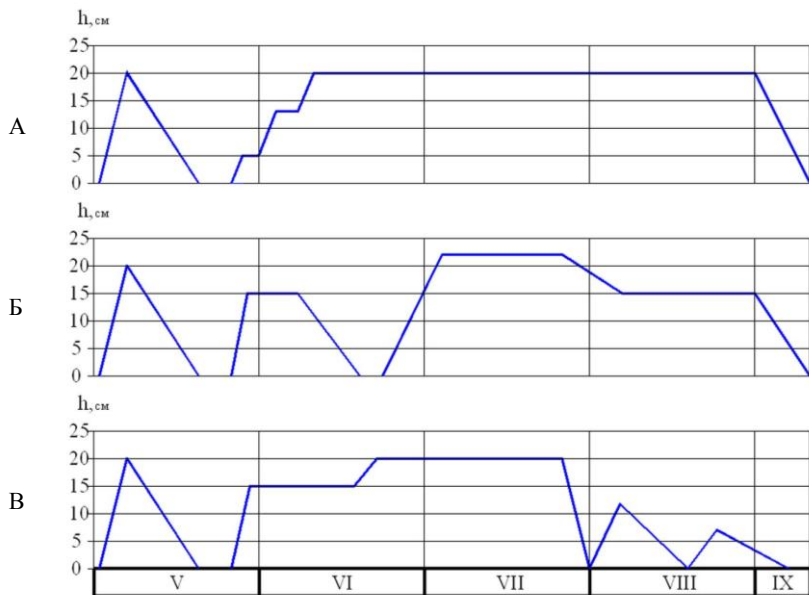
Однако от постоянного затопления сроком от посева до восковой спелости зерна с заделкой семян в почву на глубину 1–2 см пришлось срочно отказаться в связи с массовой гибелью семян, находящихся в почве под слоем воды. По данным П. С. Ерыгина [7], гибель семян достигла на Кубани (1931) – 75%, на Дальнем Востоке (1936) достигла 60 %, на Украине (1937) – 80%, в Средней Азии (1938) – 90%. Когда была установлена основная причина гибели семян (недостаток и даже полное отсутствие в зоне их размещения растворенного в воде кислорода), был предложен способ, получивший название «укороченное затопление» (УЗ), суть которого заключалась в устройстве коротких перерывов в затоплении в отдельные периоды развития риса. В частности, известны 3 вида УЗ:

1) сброс слоя воды в период получения всходов (после наклеивания семян под водой). Продолжительность отсутствия слоя 6–8 дн. Этот вариант УЗ способствовал получению более густых всходов, однако добиться оптимальной густоты (250–300 раст/м²) практически не удалось.

2) двухнедельное прекращение подачи воды из водохранилища, когда становится очевидным, что ее не хватит для завершения жизненного цикла риса. Продолжительность полного отсутствия слоя воды 4–6 дн. Кроме экономии воды, кратковременное осушение инициирует прекращение кушения и переход к плодоношению.

В этом варианте для формирования высокого урожая рекомендуется также после кратковременного осушения чеки затопливать глубоким (20–22 см) слоем воды для понижения температуры почвы, что обеспечивает благоприятные условия для формирования продуктивной зачаточной метелки. В наших опытах снижение температуры почвы в этот период в среднем на 2°С в дневные часы способствовало повышению урожайности риса: у сорта Лидер – на 21 %, Лиман – 18 %.

3) организация межсистемного двухтактного водооборота с помощью Фёдоровского гидроузла в фазу созревания риса в остро-засушливые годы. Продолжительность одного такта 4–5 дн (рисунок 2.9).



А) укороченное затопление с получением всходов без слоя воды; Б) то же с повышением слоя в фазу формирования зачаточных структур; В) прерывистое затопление в августе – сентябре в случае явного недостатка воды в водохранилище для завершения жизненного цикла растений риса

Рисунок 2.9 – Модели водных режимов рисовых чеков

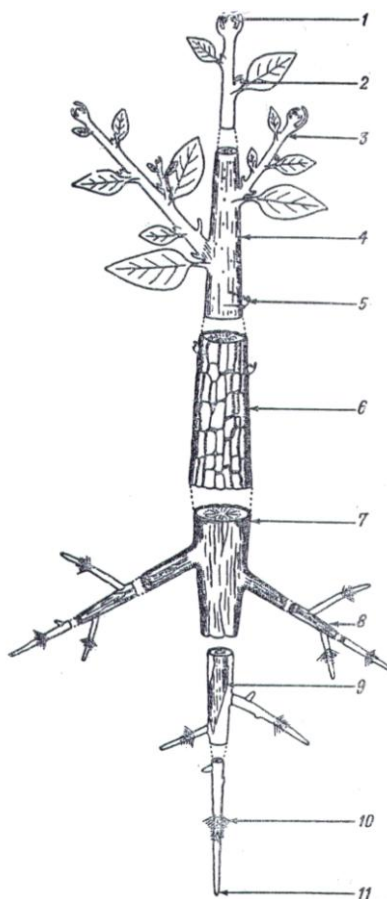
3 ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАСТЕНИЙ И ГИДРОХИМИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

3.1 Внутренняя организация и структура тела растений

Как известно [58], тело растения состоит из морфологически четко очерченных единиц – клеток, каждая из которых заключена в свою собственную оболочку и соединена с другими посредством межклеточного цементирующего вещества. Клетки являются строительным материалом для формирования различных частей и элементов растения, при этом каждая из них работает по своей собственной генетической программе.

Морфологически растения состоят из трех основных частей, онтогенетически взаимосвязанных друг с другом – корни, стебли и листья (рисунок 3.1). Они различаются не только морфологически, но и функционально: корни служат для поглощения из почвы воды и элементов минерального питания, стебли – для обеспечения их устойчивости над почвой и размещения листьев, количество которых зависит от онтогенетической программы развития растения в целом, листья – для производства первичной фотосинтетической продукции (углеводов).

В анатомическом отношении каждая из названных частей растения состоит из сложной многослойной покровной ткани, проводящих сосудов (ксилема, флоэма) и тканей, укрепляющих сформировавшиеся части растений внутри корня, стебля и листьев. При этом клетки ксилемы образуют сложную как в структурном, так



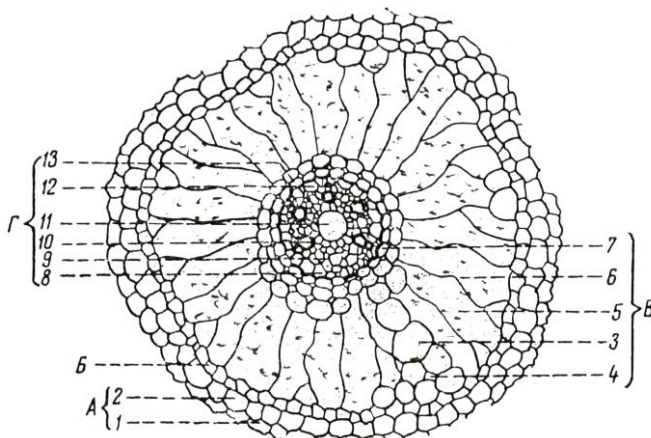
- 1 – апекс главного побега; 2 – пазушная почка; 3 – пазушный побег; 4 – стебель с молодой перидермой; 5 – спящая почка; 6 – стебель с чешуйчатой корой; 7 – стержневой корень с перидермой; 8 – боковой корень; 9 – перидерма; 10 – корневые волоски; 11 – апекс главного корня

Рисунок 3.1 – Строение многолетнего двудольного растения

и в функциональном отношении ткань в виде полых водонепроницаемых сосудов, которые, не прерываясь, проходят по всему телу растения от кончика корней до кончика листьев. Ткань ксилемы сложена волокнами и склереидами. Сосуды ксилемы служат для

проведения воды и для опоры стебля, играя роль арматуры в железобетоне.

В целом, если посмотреть на растение в поперечном разрезе (рисунок 3.2), то оно в структурном отношении представляет собой капиллярно-пористое тело, постоянно заполненное движущейся (при жизни) водой.



А – покровные ткани: 1 – эпидермис; 2 – экзодерма; Б – склеренхиматический цилиндр; В – внутренняя кора; 3 – паренхимные клетки с межклетниками (4); 5 – аэренхима; 6 – тяжи клеточных оболочек; 7 – эндодерма; Г – центральный (осевой) цилиндр: 8 – перицикл; 9 – флоэма; 10 – малые сосуды метаксилемы; 11 – большие сосуды метаксилемы; 12 – сосуды протоксилемы; 13 – соединительные клетки

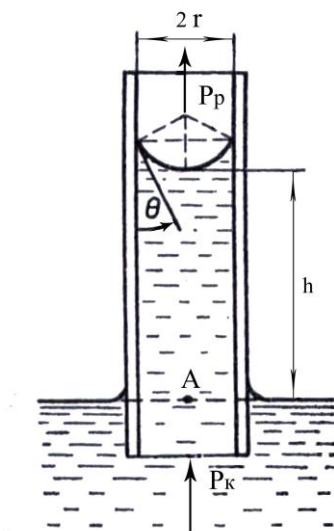
Рисунок 3.2 – Поперечный разрез корня

Природа, наделив растения такой внутренней структурой и жизненно необходимой энергией, выполнила важную миссию по их устойчивому гармоничному развитию в диалектическом един-

стве с окружающей средой. Особенно важную роль в этом отношении играют сосуды ксилемы как капилляры в теле растения.

3.2 Явление капиллярного подъема жидкости

Из курса физической химии известно [8, 17], что при опускании в воду нижнего конца тонкой стеклянной трубочки, открытой сверху и снизу (рисунок 3.3), наблюдается хорошо известное явление капиллярного подъема («капилляр» в переводе с латинского означает «волосной»).



P_p – результирующая сила; P_k – сосущая сила

Рисунок 3.3 – Схема капиллярного подъема

Непосредственной причиной, заставляющей воду подниматься против силы тяжести вверх, является сила молекулярного взаимодействия между молекулами воды (или иной жидкости) и молекулами на поверхности твердой стенки капиллярной трубочки. Эта сила получила название «поверхностное натяжение жидкости» σ , величина которого зависит от рода жидкости (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Поверхностное натяжение жидкости (дн/см)

Температура, град. С	Род жидкости					
	H ₂ O	CCl ₄	C ₆ H ₆	C ₆ H ₅ NO ₂	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ COOH
0	75,6	29,0	31,6	46,4	24,0	29,5
25	72,0	26,1	28,2	43,2	21,8	27,1
50	67,9	23,1	25,0	40,2	19,8	24,6
75	65,5	20,2	21,9	37,3	–	22,0

По своему физическому смыслу сила σ является работой, которую надо затратить, чтобы изотермически и квазистатически увеличить поверхность жидкости на единицу при сохранении ее объема неизменным. Жидкость в капилляре будет подниматься вверх до тех пор, пока сила поверхностного натяжения не уравновесится силой тяжести столбика поднятой воды, тянущей ее вниз. Высота поднятия h определяется формулой

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (3.1)$$

где θ – краевой угол (рисунок 3.4), величину которого можно получить из формулы (3.2);

r – радиус капилляра;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение силы тяжести;

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{ТГ}$, $\sigma_{ТЖ}$, $\sigma_{ЖГ}$ – поверхностное натяжение на границе двух сред: твердое тело – газ, твердое тело – жидкость, жидкость – газ.

Для воды при $r = 5$ мкм $h = 1,5$ м; $r = 0,5$ мкм, $h = 14,4$ м.

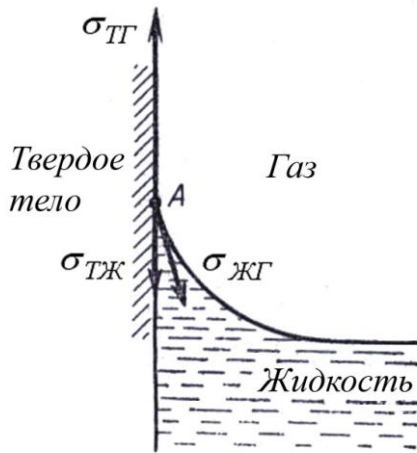


Рисунок 3.4 – Схема сил молекулярного взаимодействия в капилляре

Явления молекулярного взаимодействия в капилляре каждый из нас мог наблюдать на примере хорошо промытого стеклянного стакана, частично наполненного водой. Даже невооруженным взглядом видно, что в стакане поверхность воды, примыкающей к его стенке, отклоняется вверх от плоской формы, наблюдаемой в средней части, образуя вогнутую поверхность (мениск). Если при-

нять диаметр стакана равным диаметру волоса, как показано на рисунке 3.3, то силы поверхностного натяжения хватает, чтобы поднять столбик воды на определенную высоту.

Отметим еще одно свойство капилляра. Если он касается воды и заполняется ею целиком, то при обламывании его на половине высоты вода не будет фонтанировать и переливаться, так как радиус кривизны мениска увеличится, и поверхность воды будет прочно удерживаться на этой высоте.

Явление капиллярности играет огромную роль в природе. Достаточно сказать, что все живое в значительной степени живет благодаря этому явлению [17].

3.3 Вода как растворитель и средство транспорта минеральных удобрений в теле растения

Как известно, минеральные удобрения поступают в растительный организм только в растворенном виде, и это вполне объяснимо. Во-первых, минеральные удобрения – это твердые химические соединения и двигаться в почве по направлению к корням они могут только вместе с током воды. Во-вторых, удобрения, попав в воду, вступают во взаимодействие с ее молекулами, обладающими высокой полярностью, что приводит к неизбежному их растворению. И в-третьих, молекулы нерастворимых сложных химических соединений имеют, как правило, крупные размеры и корневой ситовидный чехлик растений не пропускает их через свои отверстия внутрь корня, кроме оксида кремния SiO_2 , молекулы которого

имеют одинаковый диаметр с молекулой воды и, будучи гидрофобными, ею не смачиваются и потому ведут себя как молекула воды.

Механизм растворения удобрений заключается в следующем [25]. Молекулы воды в силу высокой полярности обладают способностью притягивать молекулы других веществ. При соприкосновении с водой какой-нибудь соли образующие ее кристаллическую решетку ионы будут притягиваться противоположно заряженными частицами воды (катионы отрицательным полюсом, а анионы – положительным). Чтобы ионы кристаллической решетки оторвались друг от друга и перешли в раствор, необходимо преодолеть силу притяжения этой решетки. При растворении солей такой силой является притяжение ионов решетки молекулами воды, характеризующееся так называемой энергией гидратации. Если энергия гидратации будет по сравнению с энергией кристаллической решетки достаточно велика, ионы будут оторваны от последней и перейдут в раствор.

В воде могут растворяться твердые, жидкие и газообразные вещества. Их растворимость зависит от химической природы вещества и температуры (таблица 3.2). Как видно из таблицы, хорошо растворяются $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ и сахароза, слабо растворяются CaSO_4 , K_2CO_3 и NaCl . Остро реагируют на температуру KNO_3 и сахароза, в то время как растворимость газов (азот, кислород и углекислый газ) в воде с повышением температуры снижается и при температуре 100°C их количество равно 0.

Таблица 3.2 – Растворимость некоторых веществ при разной температуре, % [25]

Вещество	Температура, град С					
	0	10	20	30	40	50
Ca(NO ₃) ₂	50,5	53,6	56,4	60,4	66,2	-
CaSO ₄	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	-
K ₂ CO ₃	51,9	52,2	52,8	53,4	53,9	54,8
KCl	22,2	23,8	25,5	27,2	28,7	30,1
KNO ₃	11,6	17,7	24,1	31,5	39,1	46,2
(NH ₄)SO ₄	41,4	42,2	43,0	43,8	44,8	45,8
NaCl	26,3	26,3	26,4	26,5	26,7	26,8
Сахароза	64,2	65,6	67,1	68,7	70,4	72,3

Следует отметить две особенности растворов и растворимости:

1) Для конкретной соли величина растворимости уменьшается в присутствии другой соли, имеющей с ней одноименный ион, и наоборот, повышается, если ионы не одноименные. Так, например, если внести в почву одновременно хлористый аммоний и хлористый калий, то растворимость первого снизится, и наоборот, повысится, если к NH₄Cl внести мочевины. Именно на антагонизме ионов основано создание так называемых ингибиторов нитрификации: смешиванием CO(NH₂)₂ и (NH₄)₂SO₄ добиваются снижения скорости растворимости, вследствие чего потери двухкомпонентного удобрения также снижаются, а урожайность повышается.

2) Практика показывает, что при растворении в воде какого-либо вещества давление пара воды над ее поверхностью понижается [52]. Это объясняется действием Ван-дер-ваальсовых сил между молекулами растворителя и растворенного вещества. В связи со снижением давления пара над поверхностью воды e_0 , испарение, как это вытекает из формулы испарения E,

$$E = \alpha(e_n - e_{200}) \quad (3.3)$$

также снижается, а вместе с ним снижается транспирация. Из этого вытекает вывод: вносить удобрения лучше не полной дозой, а частями, дробно.

Как известно из курса гидрохимии [25], образовавшиеся при растворении солей ионные растворы обладают способностью проводить электрический ток, в то время как молекулярные растворы ток не проводят. Вещества, водные растворы которых проводят электрический ток, называются электролитами. Процесс распада электролитов на ионы под действием растворителя называется электролитической диссоциацией, или ионизацией.

Сущность теории электролитической диссоциации сводится к трем основным положениям:

- 1) все электролиты диссоциируют в растворах на положительно и отрицательно заряженные ионы;
- 2) под воздействием электрического тока положительно заряженные ионы движутся к катоду и поэтому называются катионами, а отрицательно заряженные – к аноду и называются анионами;
- 3) процесс диссоциации – процесс обратимый: параллельно с распадом молекул на ионы (диссоциация) идет процесс соединения ионов в молекулы (моляризация). Когда скорости обоих процессов сравниваются, наступает состояние равновесия: количество недиссоциированных молекул и ионов становится постоянным. Отношение числа диссоциированных молекул к общему числу растворен-

ных молекул называется степенью ионизации. Ее величина зависит от концентрации раствора (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Степень ионизации солей [36]

Тип соли	Концентрация раствора		
	0,1 Н	0,01 Н	0,001 Н
$A^+ B^- (KCl)$	0,83	0,93	0,98
$A^{++} (B^-)_2 (BaCl_2)$	0,75	0,87	0,95
$(A^+)_2 B^{--} (K_2SO_4)$	0,75	0,87	0,95
$A^{++} B^{--} (BaSO_4)$	0,40	0,65	0,85

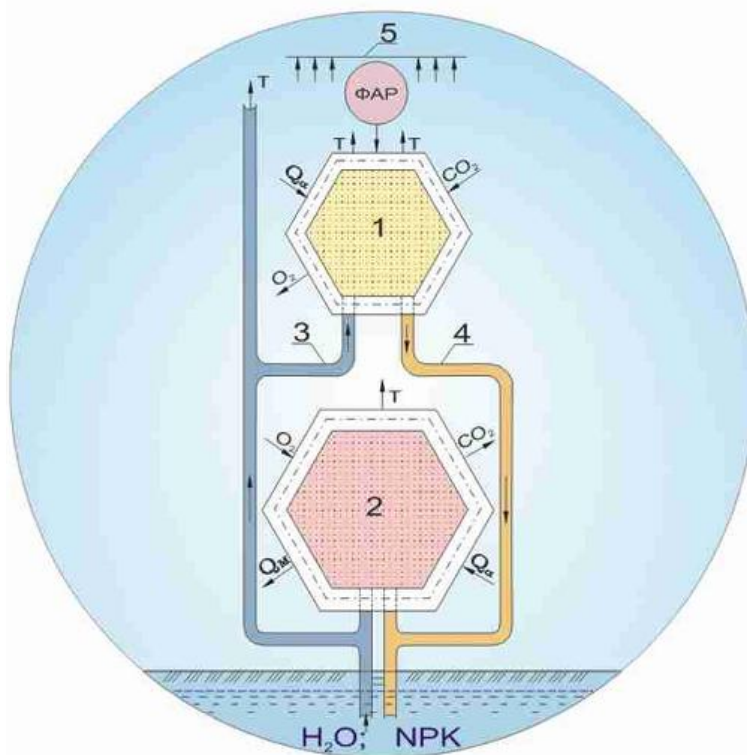
3.4 Новое видение продукционного процесса растений

Главной задачей агробиологической науки является разработка методов управления продукционным процессом, т. е. скоростью (темпами) накопления органического вещества. В последние годы термин «продукционный процесс» (ПП) получил широкое распространение в физиологической литературе, однако четкого, однозначного определения ему нет. По мнению А. В. Наумова [21], под ним следует понимать процесс образования органического вещества в результате взаимодействия основных факторов продуктивности. Такое определение ПП хрестоматийно, оно не дает представления о его кинетике и энергетике, без чего разобраться в физике ПП невозможно, и тем не менее, примем это определение за основу и с учетом новой и важной информации, приведенной выше (п. 3.1–3.3), изложим новые представления о физике ПП и кибернетике управления его производительностью.

Как известно [35], растения растут и развиваются, формируя в конечном итоге хозяйственно полезную продукцию (урожай), в результате продукционного процесса, представляющего собой природную нанотехнологию, которая состоит из двух автономных, но взаимосвязанных частей: 1) «фабрики» по производству биологической продукции, которая состоит из огромного множества клеток, имеющих свою собственную оболочку (своего рода цех) и работает по индивидуальной генетической программе; 2) системы снабжения клеток сырьем – ингредиентами органического вещества. Вторая часть ПП для агрономов и программистов представляет особый, приоритетный интерес, так как от полноты и оперативности снабжения зависит скорость реакций фото- и биосинтеза, и как следствие – темп накопления биомассы.

ПП протекает в диалектическом единстве с окружающей средой (рисунок 3.5), которая обеспечивает его энергетическими (свет, тепло) и материальными (воздух, вода, минеральные удобрения) ресурсами – ингредиентами органического вещества. Из пяти названных компонентов окружающей среды, получивших название факторов жизни (ФЖ), три – свет, тепло и воздух – являются неуправляемым климатическим ресурсным фоном. Он определяет потенциал урожайности сельскохозяйственных культур в каждой конкретной климатической зоне, который для риса по странам мира колеблется в рамках ныне существующих технологий от 5 до 12 т/га (см. таблицу 1.2). При этом климатический барьер непреодолим: «климатические факторы, – как утверждает академик Н. И. Вавилов, – являются определяющими в проблеме урожайно-

сти. Они сильнее экономики, сильнее техники» [16]. В связи с этим рисоводам Приморья, к примеру, никогда не удастся выйти на уровень урожайности риса на Кубани, рисоводам Кубани – на уровень США и Испании, а последним – на уровень Австралии.



1 – клетка листа с хлорофиллом, в которой протекает фотосинтез с образованием углеводов; 2 – клетка ростового органа, в которой протекают биосинтез и дыхание; 3 – сосуд ксилемы; 4 – сосуд флоэмы; 5 – «осушая» сила атмосферы; Т – транспирация; Q_a – атмосферное тепло; Q_m – метаболическое тепло

Рисунок 3.5 – Имитационная модель продукционного процесса в рисовой экосистеме

В окружающей среде свет, тепло и воздух в рисовых зонах (45° с. ш. – 37° ю. ш.) находятся в достатке, растения усваивают лишь их небольшую часть (ФАР – 0,5–1,0 %, тепло и воздух – 2–3 %), в растительный организм они поступают самопроизвольно (в процессе радиации или в результате диффузии), поэтому не могут быть элементом программного управления производительностью ПП, тем более что они не являются лимитирующим фактором.

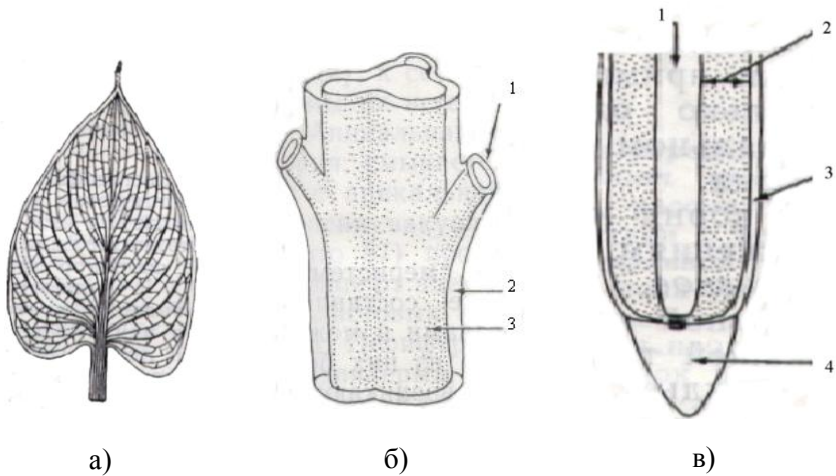
Оставшиеся два фактора жизни (вода и минеральные удобрения), в отличие от первых трех, человеком управляются: он вносит их в почву в необходимом количестве. Однако для извлечения из почвы и транспорта в надземную часть растению придется использовать энергию, а в качестве таковой, как показано в подразделах 3.1, 3.2, является молекулярная энергия капилляров. Бытующая в традиционной физиологии растений канонизированная теория о том, что энергетическим фактором для поглощения из почвы и транспорта в надземную часть растений воды и минеральных удобрений является дыхание, в акте которого освобождается тепловая энергия: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 690 \text{ ккал}$, необходимая якобы для выполнения указанных функций [46, 49, 50, 57], отвергается законами биохимии: «...живой растительный организм не является тепловым двигателем и не превращает тепло ни в какой другой вид энергии» [6]. К этому следует добавить следующий контраргумент: теория превращает агронома в беспомощного наблюдателя, так как дыхание человеком не управляется, оно протекает в миллионах клеток растения и управляется генетической программой. Природа в своем эволюционном развитии наделила рас-

тения такой капиллярной системой, которая, как показано выше (подразделы 3.1, 3.2), обладает собственной энергией и не нуждается ни в какой другой для выполнения рассматриваемых функций. Процесс превращения ее в механическую энергию заключается в следующем.

Подъемная сила капилляра передает его нижнему концу сосущую силу, являясь по сути дела генератором ее энергии. Описанное капиллярное явление физически напоминает водяной насос: поршень поднимается вверх, вода из резервуара в силу неразрывности потока следует за ним, вовлекая в это движение все, что в ней растворено, при этом объем воды в резервуаре соответственно снижается.

Согласно анатомическим исследованиям ботаников [58], сосуд ксилемы растения представляет собой тончайшую (1–20 мкм), невидимую простым глазом полую, открытую сверху и снизу трубку (стелу) с твердыми водонепроницаемыми стенками, которая начинается на кончике корня и заканчивается на периферии листа растения (рисунок 3.6). С сосудом ксилемы сообщаются клетки растения, которые получают от него водно-питательные растворы, необходимые для биохимических реакций с углеводами, поступающими в клетку по сосудам флоэмы.

Опишем еще одно важное свойство капилляров. Как только вода в капилляре достигнет устья, его подъемная сила, действующая только в пределах трубки (взаимодействие молекул воды с воздухом практически равно нулю), исчезает, а вместе с ней исчезает и сосущая сила корней. В связи с этим поступление питательного раствора также прекращается.



а) лист (жилкование); б) стебель (1 – придатки, 2 – первичная кора; 3 – стела);
 в) кончик корня (1 – центральный цилиндр; 2 – первичная кора; 3 – эпидерма;
 4 – корневой чехлик) [58]

Рисунок 3.6 – Фрагментарная структура ксилемы

Однако испарение с устья капилляра (т. е. транспирация), понижает уровень воды, обнажая в устье часть твердой стенки капилляра, и подъемная сила снова появляется. Она действует постоянно: сколько воды испарится, столько ее поднимется из влажной почвы. Иными словами: транспирация, понижая уровень воды в устье, является генератором энергии для постоянного наличия действующих сил – подъемной у капилляров и сосущей у корней, выполняя по сути дела роль двигателя.

Теоретически между транспирацией T и урожайностью риса $У$ существует функциональная связь [28]:

$$У = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot T \cdot K \text{ (т/га)}, \quad 400 \leq T \leq 900 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

где α – содержание в почвенном растворе сбалансированного количества минеральных удобрений (физиологически уравновешенный раствор), мг/л;

β – содержание в сухом веществе минеральных удобрений, в долях от общего;

K – отношение зерна к соломе.

Физика уравнения (3.3) понятна: поскольку элементы минерального питания поступают в растительный организм вместе с транспирационным током, то чем выше его интенсивность, тем больше клетки получают удобрений, тем выше урожай.

Описанное новое свойство высших растений по своей сущности может быть отнесено к статусу открытия. Вот его формула:

1. Установлено ранее не известное свойство высших растений утилизировать через посредство транспирации капиллярную гидравлическую энергию сосудов ксилемы для передачи корням со-сущей силы (десукция), необходимой для поглощения из пор влажной почвы воды и растворенных в ней минеральных элементов и транспорта их в надземную часть растения, как в виде ионов, так и в виде молекул нерастворимых в воде химических соединений, например, SiO_2 [31, 32, 35].

В изложенной формуле фигурирует транспирация, для осуществления которой необходима внешняя энергия, которой в 5-компонентной совокупности ФЖ нет. Она представлена в следующей формуле нового открытия:

2. Установлено ранее неизвестное свойство биологических экосистем использовать градиент упругости водяного пара в атмосфере (ГУВПА) в качестве генератора энергии для транспирации—ключевого координирующего звена и регулятора производительности продукционного процесса [35].

ГУВПА является шестым фактором жизни, определяет испаряемость в климатическом регионе и потому в большинстве случаев измеряется в миллиметрах. Механизм действия градиента напоминает в какой-то степени работу воздушного насоса: способствуя выделению из травяного покрова паров воды, он усиливает испарение. По климатическим зонам испаряемость изменяется от 250–300 мм (Приморье) до 800–850 мм (Австралия) [14].

Нами установлена корреляционная связь между испаряемостью и урожайностью риса $У$ [35]:

$$У = \lambda(E_n - E_o) \text{ (т/га)}, \quad (3.4)$$

где λ – показатель продуктивности испаряемости, зависящий от содержания в почве удобрений и в среднем по странам мира равный 0,01 т/га мм;

E_n – испаряемость потенциальная, под которой понимается количество воды, которое может испариться с открытой водной поверхности за вегетационный период, мм;

E_o – порог испаряемости, ниже которого рис не формирует хозяйственно-полезного урожая ($E_o \approx 100$ мм).

С остальными показателями климата (ФАР, температура, влажность воздуха) связь слабая, а с отдельными из них – отрицательная [29].

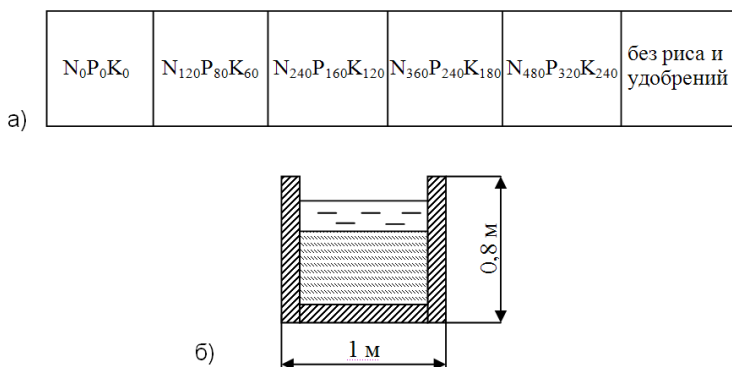
Для подтверждения гипотезы о координирующей и энергетической роли транспирации проведены экспериментальные исследования. Выполнены они в трех бетонных лотках $6 \times 1 \times 0,8$ м, разделенных водонепроницаемыми перегородками на 6 отсеков 1×1 м для исключения диффузионного переноса удобрений из одного отсека в другой, и заполненных почвой с рисового орошаемого участка (рисунок 3.7). Изучали реакцию репрезентативного сорта риса Лиман на возрастающие дозы удобрений ($\text{г}/\text{м}^2$): 1 – $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$, 2 – $\text{N}_{12}\text{P}_8\text{K}_6$, 3 – $\text{N}_{24}\text{P}_{16}\text{K}_{12}$, 4 – $\text{N}_{36}\text{P}_{24}\text{K}_{18}$, 5 – $\text{N}_{48}\text{P}_{32}\text{K}_{24}$ и 6 – (без риса) для учета испарения и, как следствие, транспирации.

В качестве удобрений использовали мочевины, суперфосфат (простой) и хлористый калий. Повторность опытов трехкратная, режим орошения – постоянное затопление слоем воды 5–10 см.

В процессе проведения исследований велись наблюдения и учеты: фенологии, температуры и влажности воздуха, количества подаваемой воды, испарения, транспирации, а также расчет начального осмотического давления почвенных растворов по Вант-Гоффу. Параллельно с вегетационными проведены сопоставительные наблюдения за развитием растений в полевом мелкоделяночном опыте с тем же сортом [5].

Визуальные наблюдения показали, что во всех отсеках вегетационного опыта растения до появления третьего листа развивались одинаково. Затем, в течение всего последующего периода, наблю-

дались существенные различия в росте и развитии риса и продолжительности межфазных периодов и всей вегетации в целом. В частности, в варианте без удобрений рис не кустился, а в варианте 5 ($N_{48}P_{32}K_{24}$) из-за наступления осенью низких температур воздуха дату окончания вегетации установить не удалось (таблица 3.2).



а – план; б – поперечный разрез

Рисунок 3.7 – Бетонный лоток для осуществления опыта

Таблица 3.2 – Влияние возрастающих доз удобрений на даты наступления фаз и продолжительность вегетационного периода*

Доза удобрений, $г/м^2$	Фаза вегетации				Продолжительность периода вегетации, дн
	кущение	выметывание	молочная спелость	полная спелость	
$N_0P_0K_0$	–	18.08	30.08	27.09	125
$N_{12}P_8K_6$	10.06	08.08	17.08	22.09	120
$N_{24}P_{16}K_{12}$	21.06	15.08	22.08	28.09	126
$N_{36}P_{24}K_{18}$	21.06	28.08	05.09	16.10	144
$N_{48}P_{32}K_{24}$	24.06	01.09	08.09	не определена	Более 150

*Посев и затопление осуществлены 25 мая

Количественные результаты био- и гидрометрических измерений и учетов, представленные в таблице 3.3, для выявления закономерностей переведены в графический вид (рисунок 3.8).

Таблица 3.3 – Био- и гидрометрические показатели урожая и водопотребления риса при возрастающих дозах удобрений

Доза удобрения в расчете на 1 га	Коэффициент продуктивности кущения	Урожай, г/м ²	Масса 1000 зерен, г	Количество колосков на метелке, шт.	Пустозерность, %	Масса соломы, г/м ²	Водопотребление, мм
Вегетационный опыт							
N ₀ P ₀ K ₀	1,0	63,0	26,13	30	12,8	70,3	388
N ₁₂₀ P ₈₀ K ₆₀	2,9	570	28,21	75	12,5	476	674
N ₂₄₀ P ₁₆₀ K ₁₂₀	4,7	977	29,02	79	11,8	880	943
N ₃₆₀ P ₂₄₀ K ₁₈₀	4,5	826	28,14	66	15,8	880	847
N ₄₈₀ P ₃₂₀ K ₂₄₀	3,8	600	26,71	55	23,0	1290	672
Полевой опыт							
N ₀ P ₀ K ₀	1,0	225	28,30	69	10,3	–	–
N ₆₀ P ₄₂ K ₃₀	1,1	512	29,10	88	12,0	–	–
N ₉₀ P ₆₃ K ₄₅	1,2	554	28,70	94	14,2	–	–
N ₁₂₀ P ₈₄ K ₆₀	1,3	589	28,00	100	16,4	–	–
N ₁₅₀ P ₁₀₅ K ₇₅	1,1	557	27,60	87	18,2	–	–

Установлены следующие закономерности:

1. Удельная, приходящаяся на 1 стебель, суммарная (за вегетационный период) транспирация (кривая 4) изменялась по гиперболической кривой, нижняя ветвь которой стремится к 0,5 максимальной величины. Это указывает на то, что с 240 кг N/га наступило насыщение раствора: вместо ионизации проходила моляризация. Причиной изменения транспирации является возрастающее осмотическое давление $P_{осм}$ (от $1,2 \cdot 10^5$ до $19,3 \cdot 10^5$ н/м², или 1,2 – 19,3 атм.).

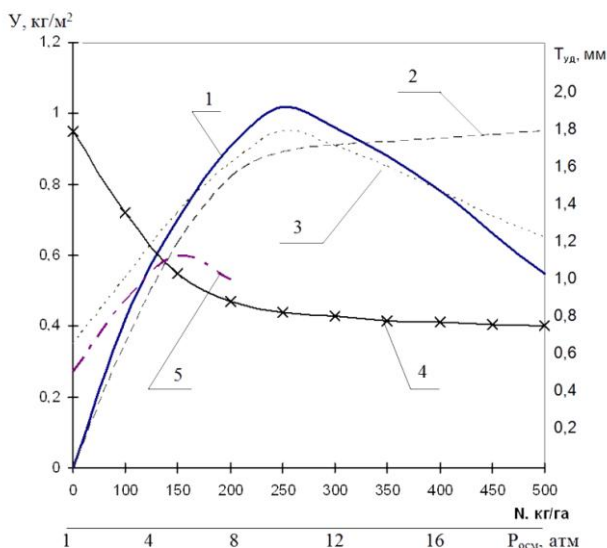


Рисунок 3.8 – Влияние возрастающих доз удобрений на урожай зерна (1), соломы (2), общую (3) и удельную (4) транспирацию, урожай зерна в полевом опыте (5)

2. Общая суммарная транспирация $T_{\text{общ}}$ (кривая 3) изменялась по параболе, возрастая от минимального значения при нулевых дозах удобрений ($N = 0$) до максимального при $N = N_{\text{опт}}$ и затем снижалась при дальнейшем возрастании доз ($N > N_{\text{опт}}$). Максимальная величина суммарной транспирации (943 мм), при которой оказался наивысший урожай зерна, получена при $N_{\text{опт}} = 240$ кг/га и $P_{\text{осм}} = 8,3$ атм.

3. Урожайность зерна риса (кривая 1) изменялась синхронно с суммарной транспирацией, между ними установлена тесная корреляция.

ляционная связь $r = 0,95 \pm 0,02$: чем выше транспирация, тем больше удобрений растения усваивают, тем выше (как следствие) урожай. Коэффициент корреляции урожая с дозами удобрений оказался незначительным $- 0,252 \pm 0,559$.

4. Урожайность соломы (кривая 2) постоянно возрастала за счет появления новых стеблей и листьев, однако темпы ее прироста в пределах доз удобрений от 0 до 240 кг N/га оказались значительно выше, чем при $N > 240$ кг/га. Этим, собственно, и объясняется тот факт, что суммарная транспирация и урожайность в зерне, несмотря на ингибирующее влияние осмотического давления, при $N \leq 240$ кг/га возрастали, а при $N > 240$ кг/га – наоборот, снижались. Иными словами, темпы роста листовой поверхности в первом случае перекрывали возможности ингибирования роста осмотическим давлением, а во втором – наоборот.

5. Разница в максимальной величине урожайности в полевом (кривая 5) и вегетационном (кривая 1) опытах составила 60 %. Это объясняется тем, что на массиве рисового чека боковая турбулентная диффузия водяного пара в стеблестое наблюдается только в узких (≈ 1 м) полосах, примыкающих к его периметру и составляющих 6% массива, в то время как в одиночно стоящем лизиметре боковой турбулентный обмен не ограничен. По этой причине дефицит влажности воздуха в травостое рисового чека оказывается в 2–2,5 раза ниже, чем над травостоем (таблица 3.4). Величина транспирации в этом случае снижалась более чем в 2 раза.

Таблица 3.4 – Дефицит влажности воздуха (мб) в рисовом чеке в период после смыкания травостоя

Высота измерения, м	Фаза вегетации				Испаряемость за период, мм
	выход в трубку – выметывание	выметывание – молочная спелость	молочная – восковая спелость	восковая – полная спелость	
2,0	10,8	11,5	9,7	4,8	182,1
0,5 (внутри травостоя)	5,4	5,5	4,6	2,2	73,8

Таким образом, гипотеза об энергетической роли транспирации в ПП, в частности в поглотительно-транспортной деятельности корней, подтверждается экспериментально.

Что касается дыхания, которому физиологи единодушно приписывают роль энергетического фактора для «проявления всех жизненных отправления» [50], то ему природой определена иная, но не менее, а более важная роль [30]. Она также относится к статусу открытого со следующей формулой:

3. Установлено неизвестное ранее свойство высших растений для поддержания нормального функционирования клеток исключать [30] из их цитоплазмы избыточную, не обеспеченную минеральными элементами, часть углеводов путем окисления и вывода ее в присутствии кислорода согласно уравнению:



Необходимость дыхания (т. е. окисления) диктуется следующими обстоятельствами.

В идеальных условиях, которые трудно создать даже искусственно, в клетки растительного организма должно поступать сбалансированное количество глюкозы и минеральных удобрений (примерно 5:1), которые в результате биохимических реакций в конечном итоге полностью превращаются в ферменты и органоминеральный «строительный материал» для роста и деления клеток. Практически же количество глюкозы значительно (более чем в 1,4 раза) превышает количество извлеченных из почвы минеральных элементов. В этом случае избыточная часть глюкозы, превращаясь в сахарозу и крахмал, частично направляется в запасники (вакуоли), из которых она в ночное время переходит в цитоплазму и расходуется на биосинтез. Остальная (избыточная) часть, становясь балластной, направляется в митохондрии, где окисляется, а продукты окисления выводятся в окружающую среду, создавая благоприятные условия для не прерывающегося ни на минуту ПП. Если бы не было дыхания, вакуоли, увеличиваясь в объеме от избытка углеводов, полностью вытесняли бы цитоплазму, в результате чего клетка погибла бы. Такие процессы наблюдаются на сильнозасоленных землях, где бесполезные для растений соли, накапливаясь в вакуолях и будучи несорасеиваемыми, полностью вытесняют цитоплазму, без которой растение погибает.

Растительный организм, в отличие от животного, не превращает тепло ни в какой другой (механический, мышечный) вид энергии – оно полностью рассеивается в окружающей среде.

Новые представления о физике ПП позволяют ответить на многие вопросы, которые не под силу современной физиологии растений. Приведем лишь два из них:

1. Почему в Австралии при одинаковых агротехнике и суммах температур ($2596 \pm 5,6$ %) получают урожаи риса в 1,5 раза выше, чем в США, и в 2 раза – чем в Краснодарском крае?

2. Почему в субтропиках урожаи риса в зимний период выше, чем в летний, хотя по нынешним представлениям должно быть наоборот?

Ответ очевиден: в Австралии и в зимний период в субтропиках климат более сухой, в связи с чем испаряемость и транспирация существенно выше.

Капиллярная система высших растений – это второе после фотосинтеза гениальное творение Природы, без которого жизнь на нашей планете была бы только в водоемах, а суша представляла собой каменистую пустыню. Капиллярная система позволила водным растениям выйти на сушу и в результате длительной эволюции превратить их в высшие растения.

Для растений-гидрофитов (у ботаников – гидатофиты), живущих в воде во взвешенном состоянии или укоренившихся на дне водоемов, необходимость в транспирации отпадает, так как нужные для жизни газы (углерод, кислород) и удобрения, растворенные в воде, поступают в растительный организм самопроизвольно: в межклеточные пространства [18] за счет энергии диффузии, а внутрь клеток – за счет осмоса. Корни растений второго типа (гидрофитов) выполняют вместе со стеблями роль якоря, предохра-

няющего их от выноса в открытое море или водоем, где они погибают.

Что касается так называемого глубоководного риса, который находится под слоем воды 4 м и более, то, во-первых, он может пробыть под водой не более 7 сут, а во-вторых, к плодоношению он переходит только после выхода верхней части из под слоя воды. По этой причине он отнесен не к гидрофитам, а к гигрофитам. Убирают глубоководный рис с лодок, срезая его надводную часть [49].

Новые представления о поглотительно-транспортной деятельности корней обоснованы эвристическими, аксиоматическими и анатомическими исследованиями, правдоподобны с физической точки зрения и подтверждены экспериментально. Они «вооружают» агроинженеров системой методов математического моделирования для разработки геоинформационных компьютерных технологий программного управления продуктивностью орошаемых агрофитоценозов. Из новых представлений следует, что вся агрономическая часть технологии возделывания культур преследует одну цель – создать посредством агроприемов благоприятные условия для повышения интенсивности и эффективности транспирации как генератора энергии, ключевого звена и регулятора производительности продукционного процесса растений, при этом транспирация доводит оптимальную дозу удобрений до 240 кг N/га (для риса).

Транспирация, в отличие от физического испарения, зависит не только от сухости климата, которая человеком не регулируется, но и от многих других факторов. Так, повышают интенсивность

транспирации некоторые агроприемы. В таблице 3.5 представлены агроприемы для культуры риса, многие из которых могут быть использованы и для других зерновых культур.

Таблица 3.5 – Способы регулирования транспирации для культуры затопляемого риса

Агроприем, метод	Физика причин, повышающих интенсивность транспирации	Примерное увеличение транспирации, %
1	2	3
Рыхление уплотненной почвы, а также внесение в распыленную почву структурообразователей (томасшлак, известь, орг. удобрения), посев люцерны в севооборотном поле	В разрыхленной и структурной почве благодаря увеличению активной пористости влага становится более доступной и для ее извлечения требуется меньше энергии	18–20
Использование сортов с эректоидными листьями	При большом количестве стеблей, что необходимо для получения высокого урожая, снижается влажность воздуха внутри травостоя, в связи с чем градиент упругости пара ($E_0 - E_n$) увеличивается	20–25
Дробное внесение удобрений, промывка засоленных почв, некорневая подкормка	Снижается осмотическое давление почвенного раствора, что в соответствии с законом Рауля способствует повышению испаряемости и, как следствие, транспирации	15–20
Краткосрочное осушение рисовых чеков перед началом генеративного периода, уничтожение сорной растительности в посевах	Прекращается образование непродуктивных стеблей и уменьшается густота общего травостоя, что снижает относительную влажность воздуха в нем	15–20
Высокоточная (± 3 см) планировка поверхности чеков	Достигается равномерное распределение всходов по площади чеков и исключается загущенность посевов на высоких местах	20–30

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3
Уничтожение высокой сорной растительности на дамбах и валах регулирующей сети	Снижается ветровая тень над посевами, что способствует увеличению ГУВПА	5–10
Широкорядный посев риса (30 см)	За счет повышения боковой турбуленности снижается относительная влажность воздуха в травостое	5–10
Создание тепломелиорирующего слоя воды рисовых чеках	С повышением температуры почвы в корнеобитаемом слое снижается ее вододерживаемость, поглощение воды увеличивается.	10–15
Внедрение сортов с тонкой (при дефиците воды) и толстой (при ее достатке) капиллярной системой	Увеличивается количество поглощаемых воднопитательных растворов	15–20

Как показали наши исследования, с помощью таких приемов величина транспирации увеличивается в 1,5–2 раза. При этом одновременно повышается эффективность использования растениями питательных растворов.

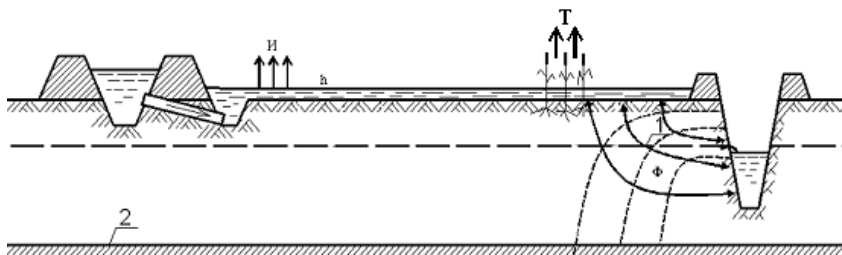
4 ГИДРАВЛИКА И ГИДРОЛОГИЯ РИСОВЫХ ЭКОСИСТЕМ

С позиций гидрологии рисовый чек – это небольшой водоем с изменяющимся по программе режимом, зарастающий в течение вегетационного периода культурной растительностью, при этом к концу фазы кушения риса поверхность водоема полностью закрывается листьями растений. Поскольку рис для России является экзотической культурой, завезенной из тропиков, а площадь его посевов составляет всего лишь 0,3 % от площади пашни, то совершенно объяснимо, что ни гидрология, ни гидрометеорология изучением механизма явлений и процессов, протекающих на рисовом чеке, а также над и под его поверхностью, не занимались. А между тем механизм и динамика таких процессов, как испарение, транспирация и дренирование (фильтрация) грунтовых вод имеют огромное значение в совершенствовании конструкции рисовых систем, экономии водных ресурсов и достижении устойчивого роста урожайности риса.

В связи с этим нами сделана попытка разработать теоретические основы главных процессов в рисовой гидрологической экосистеме – испарения, транспирации и дренирования (рисунок 4.1).

4.1 Гидрофизические явления

Испарение с открытой водной поверхностью. Рассмотрим физику процесса испарения с поверхности водоема с позиций молекулярно-кинетической теории [17].



И – испарение; Т – транспирация; Ф – фильтрация; 1 – положение уровня грунтовых вод; 2 – водоупор; h – слой воды

Рисунок 4.1 – Рисовая гидрологическая экосистема

Согласно ей, испарение – это отрыв молекул воды от испаряющей поверхности. Энергетическим фактором этого отрыва является кинетическая энергия молекул. Суть его состоит в том, что не все молекулы воды, участвующие в тепловом движении, имеют энергию, равную ее среднему значению. Часть из них обладает энергией, меньшей этой средней величины, а часть – большей. Поэтому всегда имеются молекулы, кинетическая энергия которых достаточна, чтобы совершить работу по преодолению сил притяжения со стороны других молекул. Такие молекулы вылетают за пределы жидкости, образуя над ее поверхностью пар. Если число молекул, вылетающих из нее, равно числу молекул, возвращающихся назад, этот пар является насыщенным. Если же число молекул, покинувших жидкость, становится больше числа вернувшихся назад, то пар не насыщенный. Молекулы, покидающие жидкость, собственно и составляют испарение. Оно может поддерживаться длительное время, например, откачкой паров насосом или обдуванием поверхности жидкости.

В природе в качестве воздушного насоса выступает градиент упругости водяного пара в приземном слое атмосферы, представляющий собой разность между давлением пара в зоне вылета молекул e_0 и на определенной высоте от поверхности жидкости (на метеостанциях 200 см) – e_{200} . Математически это выглядит так:

$$E = (e_0 - e_{200}). \quad (4.1)$$

Из уравнения следует, что чем больше разность $(e_0 - e_{200})$, тем интенсивнее испарение.

Градиент упругости водяного пара в атмосфере обуславливает вовлечение в движение вверх испарившихся молекул воды, которые образуют на определенной высоте дождевые облака и тучи.

Обдувание поверхности жидкости, повышающее интенсивность испарения, в природе осуществляет ветер, средняя скорость которого ω_{200} по зонам рисосеяния составляет 3,1 м/с (см. таблицу 1.7). Учесть влияние ветра на испарение теоретически очень трудно, поэтому его определяют эмпирическим путем. По опытным данным Государственного гидрологического института (ГГИ), коэффициент учета влияния ветра K на испарение определяется по формуле

$$K = (1 + 0,72 \omega_{200}). \quad (4.2)$$

Таким образом, уравнение для определения интенсивности испарения E представляется следующим образом:

$$E = \alpha (e_0 - e_{200}) (1 + 0,72 \omega) \text{ (мм)}, \quad (4.3)$$

где α – коэффициент перевода давления из миллибаров в миллиметры, а также для учета КПД отсасывания от водной поверхности. По данным ГГИ $\alpha = 0,14$.

Величина e_0 в уравнении (4.3) зависит от температуры испаряющей поверхности и рода жидкости. Ее значения для воды представлены в таблице 4.1 [56].

Таблица 4.1 – Количественная характеристика насыщенного пара в зависимости от температуры воды

Температура t, град. С	Максимально возможное коли- чество пара в 1 м ³ воздуха	Насыщающая упругость пара над водой	
		мбар	мм рт. ст.
-30	0,46	0,51	0,38
-20	1,08	1,25	0,94
-10	2,38	2,86	2,14
0	4,89	6,11	4,58
+10	9,46	12,27	9,20
+20	17,42	23,37	17,53
+30	30,60	42,43	31,82

В гидрологической литературе известно много эмпирических формул для определения величины испарения [59]. Приведем три из них, получившие большое распространение, так как они не учитывают температуру воды, которая на метеостанции не определяется.

1. Формула Н. Н. Иванова:

$$E = 0,0018 (25 + t)^2 (100 - e) \text{ (мм/мес)}, \quad (4.4)$$

где t – среднемесячная температура воздуха, град. С;

e – относительная влажность воздуха, %;

0,0018 – коэффициент, определенный опытным путем.

2. Формула Майера:

$$E = 0,5 d (1 + 0,2\omega) \text{ (мм)}, \quad (4.5)$$

где d – дефицит влажности воздуха, мм.

3. Формула Давыдова:

$$E = 0,82 d^{0,8}. \quad (4.6)$$

В агробиологических опытах, проводимых на чеках с культурой затопляемого риса, при установлении связи урожайности с метеорологическими факторами очень часто в качестве последних принимают температуру воздуха и (реже) относительную влажность воздуха, игнорируя при этом скорость ветра. А между тем она оказывает существенное влияние на испарение, и как следствие, на транспирацию, которые играют важную роль в формировании урожая (см. п. 1.4). В частности, как вытекает из формулы (4.3), величина испарения при безветрии ($\omega = 0$) оказывается в 1,7 раза меньше, чем при скорости ветра 1 м/с, и в 3,4 раза – при 2 м/с.

Испарение с поверхности зарастающего водоема. В период, когда посевы риса проходят фазы всходов, кущения, трубкования и выметывания, индекс листовой поверхности увеличивается от нуля до 4–6 и более в зависимости от сорта и продолжительности его вегетационного периода. На основе математической обработки результатов биометрических наблюдений, изложенных в работах [36,

37], нами получено следующее уравнение для определения темпов роста листовой поверхности (ИЛП) в безразмерных координатах:

$$ИЛП = ИЛП_{\text{макс}} \cdot e^{-4,5(N-1)^2}, \quad (4.7)$$

где N – продолжительность периода в долях от продолжительности фазы;

ИЛП – индекс листовой поверхности, т. е. отношение площади листьев к площади, которую занимают растения, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

ИЛП_{макс} – максимальная величина листовой поверхности сорта (скороспелые сорта – 4, среднеспелые – 6, среднепозднеспелые – 8).

Как уже отмечалось, с появлением над водой листочков риса к процессу испарения добавляется транспирация. Однако замечено, что при высоте растений не более 15–20 см и значении ИЛП менее единицы стратификация атмосферы, т.е. распределение температуры и влажности воздуха над водоемом, не изменяется, точнее, изменяется незначительно – в пределах точности метеорологических приборов. В этом случае имеются все основания формулу (4.6) представить в следующем виде:

$$E = 0,14 \cdot (e_0 - e_{200}) \cdot (1 + 0,72\omega) \cdot (1 + \text{ИЛП} \cdot \eta) \text{ при } \text{ИЛП} \leq 1, \quad (4.8)$$

где η – доля пор нановодоемов (это поры на ткани листа) в листовой поверхности, участвующих в испарении (по данным [36, 37], $\eta = 0,28\text{--}0,32$).

В таблице 4.2 для фазы всходов представлен ход средней многолетней температуры и дефицита влажности воздуха, а также рост

индекса листовой поверхности среднеспелых сортов риса (по данным агрометеостанции г. Славянск-на-Кубани и селекционного центра ГНУ «ВНИИ риса»).

Таблица 4.2 – Метеорологические и биометрические условия в фазу всходов риса (данные агрометеостанции г. Славянск-на-Кубани)

Параметры	Май		Июнь
	II	III	I
Температура воздуха, град С	16,5	18,0	19,2
Дефицит влажности, мб	6,2	6,7	7,4
ИЛП	0,3	0,6	1,0

На их основании построен график функции (4.8), из которого (рисунок 4.2) видно, что он представляет собой интегральную кривую Гаусса.

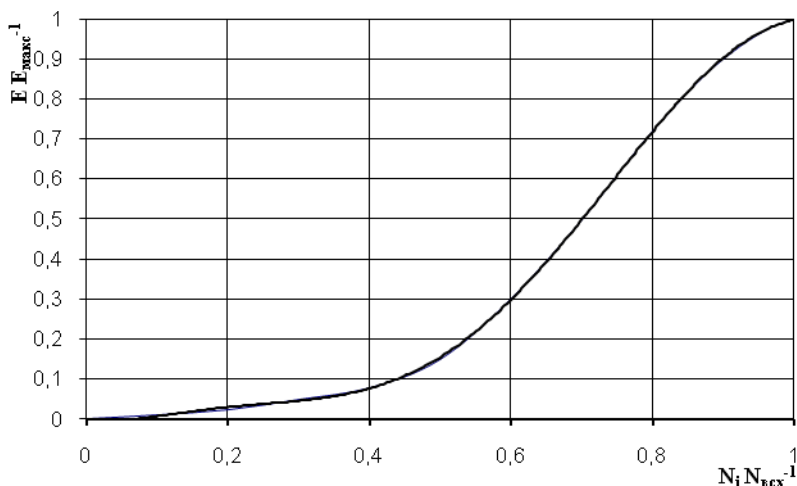


Рисунок 4.2 – График функции (4.8) в безразмерных координатах

В густом стеблестое риса высотой 1–1,2 м (что наблюдается в фазу кушения, трубкования и выметывания), достигающем 600–800 стеблей на 1 м², создаются ветровая тень ($\omega = 0$) и парниковый эффект. В результате относительная влажность воздуха в стеблестое по сравнению с этим показателем над посевами повышается на 20–30% и более, а скорость ветра равна 0. В этом случае в формулу (4.8) необходимо внести изменения: показатель влияния ветра удалить, а величину e_{200} измерять на высоте 1 м от поверхности воды. Уравнение (4.8) в этом случае принимает вид:

$$E = 0,14(e_0 - e_{100}), \text{ мм.} \quad (4.9)$$

Рассматривая физический процесс испарения с водной поверхности зарастающего водоема в безразмерных координатах (E/E_0), видим, что графически – это правая часть дифференциальной кривой Гаусса: в начальный момент времени испарение E и испаряемость E_0 равны, затем, по мере зарастания рисового чека E/E_0 уменьшается на 60 % (рисунок 4.3). В этом случае уравнение примет вид:

$$E / E_0 = e^{- (N / N_0)^2}. \quad (4.10)$$

Биологическое испарение (транспирация). Как уже подчеркивалось ранее, физика процесса транспирации изучена слабо, более того, в литературе по физиологии растений а priori канонизирована ошибочная концепция, согласно которой испарение с листьев растений осуществляется в основном через устьица, общая

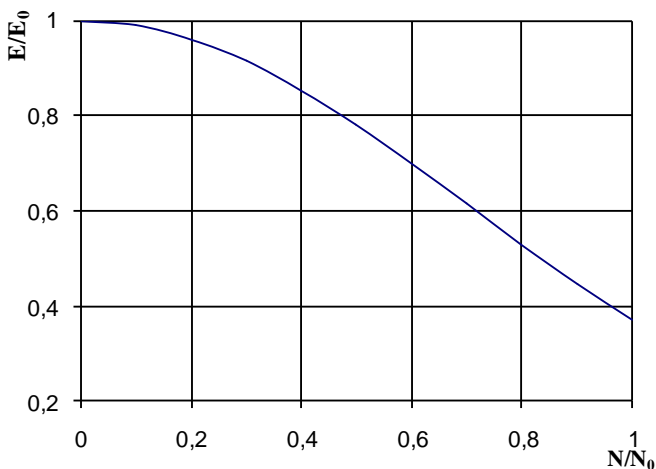
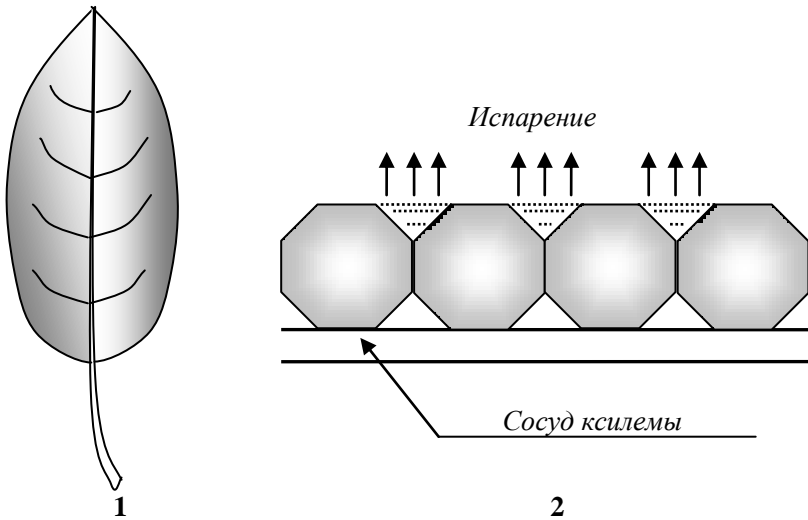
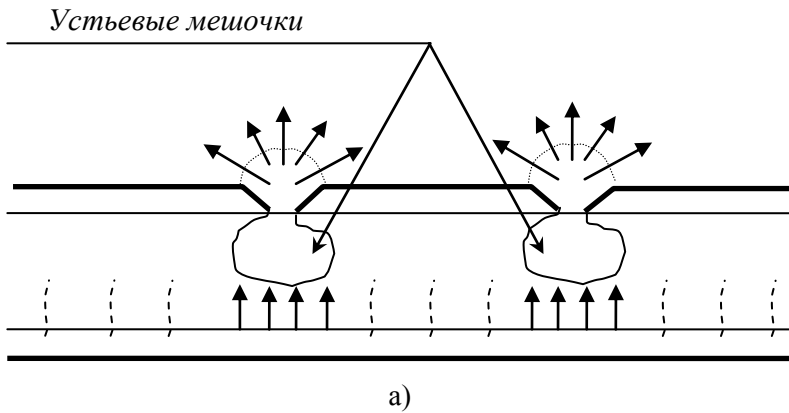


Рисунок 4.3 – Динамика испарения со слоя воды E под зарастающей водной поверхностью (E_0 – испаряемость, N_{veg} – время в долях от вегетационного периода риса)

площадь которых не превышает 3% площади листа [5]. Чтобы объяснить, почему интенсивность транспирации с единицы площади посевов в 2–3 раза выше, чем с открытой водной поверхностью, выдвинута новая концепция: устьица, по мнению [18], работают по принципу сопла турбогенератора, производительность которого в 2–3 раза эффективнее обычного испарения (рисунок 4.4 а).

Если это так, то в устьевом мешочке должно быть очень сильное давление – выше атмосферного. Совершенно очевидно, что при таком давлении воздух (прежде всего CO_2) в устьевой мешочек поступать не может, а следовательно, фотосинтез станет неосуществимым.



а – схема, объясняющая «эффект сопла» (маленькое отверстие, например устьичная щель, имеет большее диффузионное поле, чем равная площадь открытой поверхности [16]); б – модель листа (1 – поверхность листа с водопроводящими жилками, 2 – тетраэдная упаковка клеток эпидермиса)

Рисунок 4.4 – Схемы, поясняющие процессы транспирации в соответствии с различными концепциями

Согласно нашей концепции [36, 37], транспирация осуществляется через устья капилляров ксилемы и межклеточные микрощели, общая площадь которых составляет 28–32% от площади листа, при этом она как физический процесс не отличается от обычного испарения. Представим листовую поверхность как множество ячеек с водой, каждая из которых подсоединена к сосудам ксилемы (рисунок 4.4 б), устья которых размещаются на кончике листа по его контуру (см. рисунок 4.4 а). В этом случае имеются основания воспользоваться для определения скорости транспирации уравнением (4.9) с дополнением вида:

$$E = 0,14 \cdot (e_0 - e_{200}) \cdot \eta, \quad (4.11)$$

где η – доля площади ячеек на листовой поверхности.

При этом необходимо особо подчеркнуть, что транспирация по (4.11) приходится на единицу площади листа.

Однако уравнение (4.11) будет корректно при условии, что температура воды в ячейках листа будет одинаковой с температурой листа, а температура последнего – с температурой воздуха. К сожалению, сведений по этому вопросу в литературе не имеется, в связи с чем он требует решения путем проведения теоретических, а может быть, и экспериментальных исследований с целью установления соответствия данных метеостанций фактическим данным, полученным на посевах риса. При проведении теоретических исследований учтем следующие обстоятельства.

1. Как известно, клетки живых растений на 80–90% состоят из воды, что дает основание считать одинаковой теплопроводность листа и воды.

2. Вода, поглощаемая корнями растений из почвы, транспортируется по сосудам ксилемы к их клеткам. Минеральные соли, растворенные в воде, потребляются клеткой, а вода испаряется в межклеточное пространство (микрощели) и движется к поверхности листа. В ячейках пар конденсируется, а затем испаряется в атмосферу.

3. Размер микроячеек в среднем составляет 0,003 см, а половина расстояния между ними – 0,3 см. Теплопроводность клеток равна $6 \cdot 10^4$ эрг/см·град. Физика процесса такова: вода в ячейках, испаряясь, охлаждается, а поскольку температура поверхности листа между ячейками, поглощающими солнечную энергию, оказывается несколько выше, то тепло от нее стремится к ячейкам. Разница Δt между температурой в ячейке и температурой листа не превышает 0,04 °C [43].

Таким образом, полученные данные позволяют считать, что температура поверхности листа постоянна на всей площади. В заключение отметим, что размер ячеек чрезвычайно мал – их можно увидеть только под микроскопом при сильном увеличении, а поверхностное натяжение воды в тонких капиллярных щелях так велико, что вода из ячеек не изливается под действием гравитационных сил даже при наличии ветра – она может только испаряться.

Что касается связи между температурой листа и воздуха, то вначале следует отметить следующее. Как известно [44], темпера-

тура воздуха на 3–5 °С ниже температуры воды на рисовом чеке (рисунок 4.5) и практически одинакова с температурой почвы в зоне размещения основной массы корней.

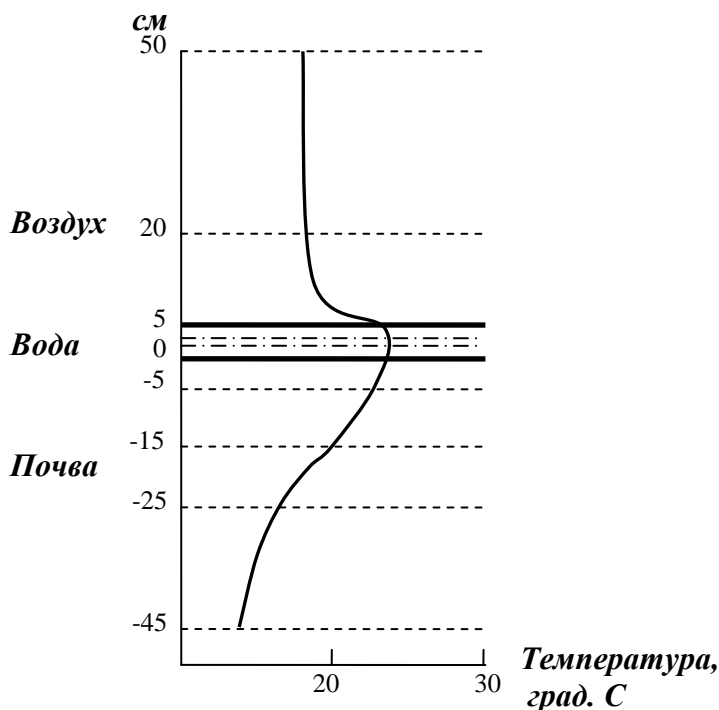


Рисунок 4.5 – Среднесуточные температуры воздуха, воды и почвы на рисовом поле (I. Nogai, 1959)

Однако эмпирических сведений о температуре поверхности листьев в этих условиях не имеется, хотя следует отметить, что на температуру листьев могут оказывать влияние многие факторы, в первую очередь солнечная радиация, которая вызывает изменение всех составляющих теплового баланса. Поглощение солнечной ра-

диации влечет за собой большее повышение температуры листа, чем температуры воздуха. Однако следует заметить, что при этом будет усиливаться транспирация, при которой температура листа, естественно, понижается (на испарение 1 см^3 затрачивается примерно 600 кал). К другим внешним факторам, которые могут оказать влияние на температуру листа, можно отнести относительную влажность воздуха, скорость ветра, густоту стеблестоя. В результате динамического взаимодействия всех перечисленных энергопотоков и препятствий устанавливается некоторая определенная для данных условий температура листа: она может быть ниже, равна или выше температуры воздуха в зависимости от сочетания факторов внешней среды. В работе [43] показано, что разница между температурой листа и воздуха $\Delta T = 0,13T$.

В частности, разница между температурой листа и воздуха будет находиться в пределах от 0,26 до 1,3 °С, что подтверждается агрометеорологическими данными [10], в которых указывается, что температура листьев растений в пасмурную погоду или находящихся в тени близка к температуре воздуха. В ясную погоду у незатененных листьев она может быть на 1–2 °С выше температуры окружающего воздуха.

На основании полученных данных уравнение (4.11) можно представить в следующем виде:

$$E = 0,14 \cdot (c'_0 - c_l) \cdot \eta, \text{ мм/сут}, \quad (4.12)$$

где c'_0 следует принимать не по температуре воды на рисовом чеке, а по температуре воздуха.

Уравнение (4.12) моделирует транспирацию с единицы площади листа, в то время как в гидрометрии водохозяйственных расчетов (оронительная и поливная нормы и др.) ее величину определяют с единицы площади посевов (м^2 , га).

В одной из наших работ [37] такое уравнение выведено:

$$E = 0,14 (e_0 - e_{200})(1 + 0,72\omega) \cdot I_{\text{макс}} \cdot e^{-\mu(t-t_0)} \cdot \gamma, \text{ мм/сут}, \quad (4.13)$$

где $I_{\text{макс}}$ – максимальная площадь листовой поверхности, наблюдаемая в фазу цветения, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

γ – доля пор на листовой поверхности, участвующая в испарении ($\gamma = 0,28-0,32$)

μ – темпы роста листовой поверхности, для районированных на Кубани сортов равные: скороспелых – 1,39; среднеспелых – 1,79; позднеспелых – 2,08;

t_0 – время (суток) в долях от вегетационного периода;

ω – скорость ветра, м/с.

На рисунке 4.6 представлен рост листовой поверхности сортов, а на рисунке 4.7 – кривая транспирации в течение вегетационного периода [37].

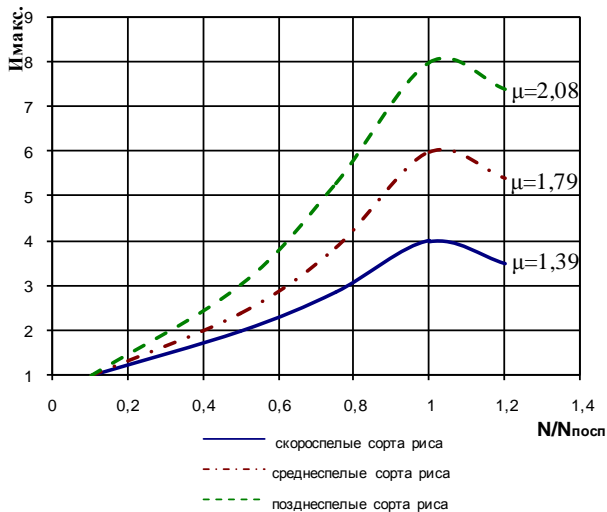


Рисунок 4.6 – Рост листовой поверхности И для скоро-, средне- и позднеспелых сортов риса

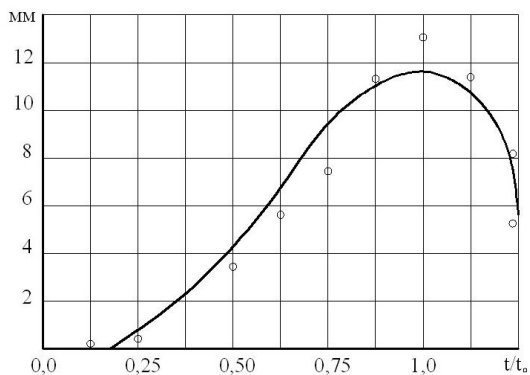


Рисунок 4.7 – Кривая, отражающая изменение транспирации риса в течение вегетационного периода (кружочками обозначены опытные данные)

4.2 Дренаживание грунтовых вод под плоской поверхностью их уровня и влияние растительности в междуренье на его величину

Когда уровень грунтовых вод является плоским и ровным, он должен представлять собой эквипотенциаль, поскольку и давление, и высота во всех его точках одинаковы. Единственный случай, при котором такие условия встречаются в природе, имеет место, когда грунтовые воды поднимаются к поверхности и затопляют ее. Наблюдается он тогда, когда дренажная система не способна выполнить основную свою функцию – удерживать грунтовые воды на определенной глубине. Однако на рисовых системах создание и поддержание слоя затопления является экологическим требованием. В этом случае наличие постоянного слоя воды обуславливает неизбежное ее дренирование в прилегающие к чекам дренажно-сбросные каналы. Основной формулой для определения величины дренажного оттока q является широко известная в гидрогеологической литературе [54] формула Дюпюи:

$$q = k \cdot \frac{h_2^2 - h_1^2}{2 \cdot L}. \quad (4.14)$$

Физической моделью для вывода формулы ее автору послужил фрагмент осушительной системы (рисунок 4.8). Многолетние гидрометрические исследования подтвердили обоснованность такой модели и ее математического представления. Однако возможность ее применения при проектировании водоотводной сети рисовых систем (что, к сожалению, нашло повсеместное распространение)

вызывает сомнение: ведь согласно модели Дюпюи уровень грунтовых вод, во-первых, находится под поверхностью земли, а во-вторых, он представляет собой эллипс, в то время как на рисовых полях фильтрация протекает под плоской поверхностью уровня грунтовых вод. Гидрогеодинамические различия настолько существенны, что игнорировать их никак нельзя – необходимы физически правдоподобные модели и формулы.

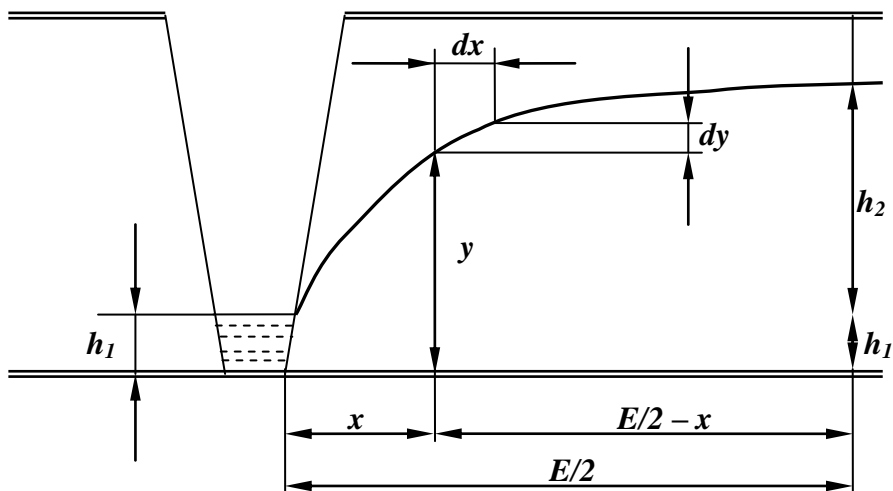
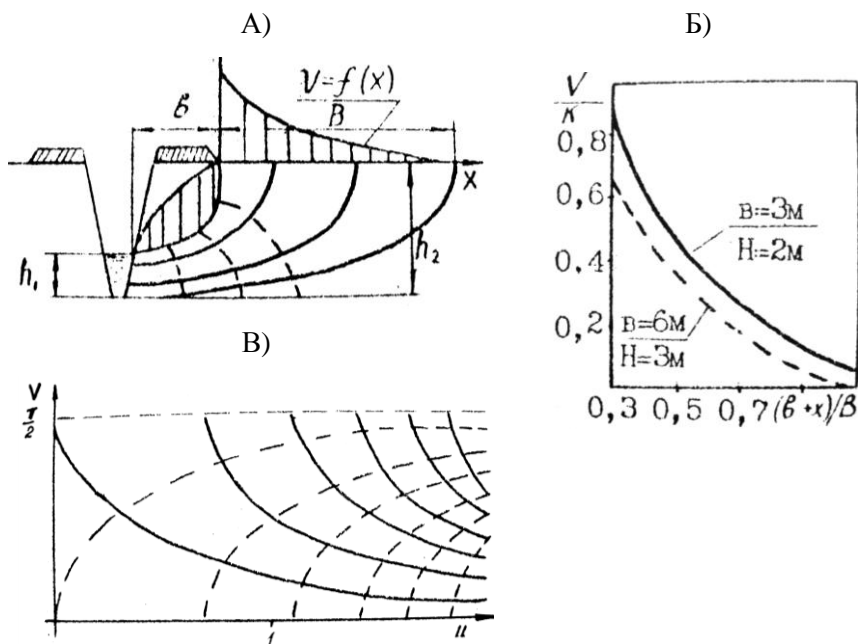


Рисунок 4.8 – Физическая модель дренирования по Дюпюи

Для вывода формулы дренирования со стороны затопленной поверхности воспользуемся теорией электрогидродинамических аналогий [12] и построим гидродинамическую сетку движения грунтовых вод под плоской поверхностью их уровня (рисунок 4.9).



А – гидродинамическая сетка в декартовой системе; Б – график зависимости скорости фильтрации в безразмерных координатах; В – образ декартовой сетки при конформном отображении

Рисунок 4.9 – Гидродинамическая сетка и распределение скорости фильтрации по поверхности затопленной почвы

Представим уравнение притока в дренах в дифференциальной форме:

$$\frac{dq}{dx} = k \cdot \frac{H}{x}, \quad (4.15)$$

- где H – действующий напор, равный $(h_2 - h_1)$;
 x – расстояние от начала координат до изучаемой точки;
 k – коэффициент фильтрации;
 q – расход на единицу ширины потока.

Для решения уравнения (4.15) и назначения граничных условий расположим ось ординат по линии боковой стенки канала, а ось абсцисс – по линии водоупора. Слой воды в чеке и уровень ее в дренажно-сбросном канале поддерживается постоянным (const). Достигается это путем подачи воды из оросителя расходом, численно равным эвапотранспирации и фильтрации, в канале – путем соответствующего открытия затвора в его устье. Примем, что почвогрунт под рисовым чеком однороден (однослойная зона аэрации).

Разделив в (4.15) переменные, получим:

$$dq = k \cdot H \cdot x^{-1} \cdot dx, \quad (4.16)$$

Интегрируя в пределах для q от 0 до q , для x – от b до B , получим:

$$q = k \cdot H \cdot \ln \frac{B}{b}, \quad (4.16^*)$$

или при замене натурального логарифма на десятичный:

$$q = 2,3 \cdot k \cdot H \cdot \lg \frac{B}{b}. \quad (4.17)$$

Для определения величины B в уравнениях (4.16^{*}) и (4.17) рассмотрим простейший случай (рисунок 4.9 а). Для преобразования гидродинамической сетки и решения поставленной задачи воспользуемся теорией конформного отображения, согласно которой

функция $\omega = f(z)$ отображает точки z -плоскости (или римановой поверхности) в соответствующие точки ω -плоскости (или римановой поверхности) [23]. В каждой точке угол такой, что $f(z)$ аналитична и $f(z) \neq 0$. Отображение по $\omega = f(z)$ конформно, т. е. угол между кривыми, проходящими через точку z , переходит в равный по величине и по направлению отсчета угол между соответствующими кривыми в плоскости ω . Кроме того, конформное отображение преобразует линии $x = \text{const}$, $y = \text{const}$ в семейство ортогональных траекторий в u -плоскости (рисунок 4.9 в). Справедливо и обратное: $u(x,y) = \text{const}$, $v(x,y) = \text{const}$ соответствуют ортогональным траекториям в z -плоскости.

В соответствии с изложенным прямую в плоскости z ($x = \text{const}$) можно представить в следующем виде:

$$\text{Im}(z \cdot e^{-i \cdot y_0}) = r, \quad (4.18)$$

где r – расстояние прямой от начала координат, Z ;
 y – угол, образуемый прямой с вещественной осью, град;
 e – трансцендентное число, равное 2,718.

Величина $y = (z - \bar{z}) / (2 \cdot i) = \text{Im} z$ называется мнимой частью z в уравнении $z = x + i \cdot y$, где x – вещественная ось, y – мнимая ось.

В полярных координатах уравнение (4.18) запишем в виде:

$$\rho \cdot \sin(y - y_0) = r, \quad (4.19)$$

В плоскости $\omega = lgz$ оно примет вид:

$$e^u \cdot \sin(\nu - y_0) = r, \quad (4.20)$$

или

$$u = \lg r - \lg \sin(\nu - y_0), \quad (4.21)$$

На рисунке 4.9 (в) представлен образ декартовой сетки в плоскости z при отображении на плоскости ω и изменении угла y от 0 до $\pi/2$. Видно, что декартова сетка претерпела поворот на 90° с растяжением. При этом из формулы (4.21) вытекает, что ширина сетки, отображенной на линии $u = \pi/2$, будет равна:

$$h_0 = \lg(B - b) - \lg b, \quad (4.22)$$

$$\text{откуда} \quad B = b \cdot (10^{h_0} + 1), \quad (4.23)$$

где h_0 – высота высачивания фильтрационных струек в дренажно-сбросном канале при отсутствии воды в нем, м.

Величина h_0 может быть определена по формулам П. Я. Полу-бариновой-Кочиной [45], которые в виду их сложности и громоздкости здесь не приводятся. Однако автором формул построены графики зависимостей h_1/h_2 от h_0/h_2 , из которых легко находится величина h_0 . Воспользовавшись ими, мы составили для практических ситуаций рисовых систем специальную таблицу (таблица 4.3), в которой отражена зависимость $h_0 = f(H_k, b)$.

Таблица 4.3 – Зависимость высоты высачивания от глубины канала и ширины оградительной дамбы b , м

Глубина канала H_k	Ширина канала b	b/H_k	Высота высачивания фильтрационных струек в дренажно-сбросном канале при отсутствии в нем воды h_0
2	3,0	1,5	0,5
2	6,0	3,0	0,3
3	3,0	1,0	1,1
3	6,0	2,0	0,6
3	10,5	3,5	0,4

Для проверки правильности теоретического решения (4.23) нами выполнены по методу ЭГДА специальные исследования. Условия кинематического, физического и динамического подобия обоснованы по методике В.М. Шестакова [54]. Сопоставление расчетной и фактической ширины зон активной фильтрации показало, что они близки друг другу: максимальная ошибка не превышает 5% (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Расчетная и фактическая ширина зоны активной фильтрации (метод ЭГДА)

Глубина канала H	Ширина канала b	b/h_2	Высота высачивания фильтрационных струек h_0	Ширина зоны активной фильтрации B , м		Ошибка, %
				фактич.	по (4.23)	
3	5	1,7	0,24	3,6	3,8	5,0
	10	3,3	0,09	2,3	2,2	4,5
5	5	1,0	0,38	13,6	14,0	3,0
	10	2,0	0,19	5,3	5,5	3,7

При наличии гидродинамической сетки скорость нисходящей фильтрации в любой точке зоны дренирования может быть

определена по формуле Дарси, которая применительно к нашим условиям будет иметь вид (рисунок 4.9 а):

$$V = k \cdot J = k \cdot \frac{h_2 - h_1}{(b + x) \cdot \rho_x}, \quad (4.24)$$

где k – коэффициент фильтрации;

b – ширина оградительной дамбы;

x – расстояние, отсчитываемое от подошвы оградительной дамбы до начала струйки z ;

ρ_x – коэффициент кривизны фильтрационных струек, обусловленной переходом их от горизонтальной затопленной поверхности к вертикальной (или близкой к вертикальной) боковой поверхности открытой дрены:

$$\rho_x = \frac{y_x}{x} > 1,$$

где y_x – длина фильтрационной струйки, начинающейся в точке x .

Как указывалось ранее, величиной ρ_x можно пренебречь.

На рисунке (4.9 б) дано графическое представление зависимости (4.24) в безразмерных координатах V/k и $(b+x)/B$. Как видно из рисунка, это ветвь гиперболы, правая часть которой стремится к нулю, а левая – к бесконечности. Отсюда, а также из анализа уравнения (4.24), вытекает важное свойство: скорость фильтрации по ширине активной зоны имеет положительное и вполне определенное значение: $\infty > V > 0$.

При $x = 0$:

$$V_0 = k \cdot \frac{h_2 - h_1}{b}, \quad (4.25)$$

при $x = B - b$:

$$V_{(B-b)} = k \cdot \frac{h_2 - h_1}{B}, \quad (4.26)$$

при $(b + x) \rightarrow 0$:

$$V \rightarrow 0.$$

Последнее выражение имеет следующий физический смысл: при отсутствии оградительной дамбы ($b = 0$) вода из чека неизбежно будет переливаться в канал, причем расходом, несоизмеримо большим по сравнению с фильтрацией.

Выше рассмотрены условия фильтрации в однородных грунтах. На рисовых системах в большинстве случаев зона аэрации представлена двумя пластами – сверху залегает слабо-, а ниже – сильнопроницаемый слой. Пользоваться уравнениями (4.23) и (4.24) можно при условии приведения двухслойной зоны к однослойной путем виртуального преобразования:

$$T_s = m_1 + \frac{k_2}{k_1} \cdot m_2, \quad (4.27)$$

где T_s – эквивалентная мощность зоны аэрации, м;
 m_1 и m_2 – мощность верхнего и нижнего пластов соответственно, м;
 k_1 и k_2 – коэффициенты фильтрации.

В одной из наших работ было получено эмпирическое уравнение для притока воды q к открытой совершенной дрене:

$$q = 0,39 \cdot \ln(3,3 \cdot x + 1). \quad (4.28)$$

Сравнивая его с (4.26), приходим к выводу, что число 0,39 в правой части уравнения есть не что иное, как произведение коэффициента фильтрации k на действующий напор H . В частности, из описания условий опыта устанавливаем, что $H = 0,31$ м, $k = 1,26$ м/сут. Их произведение дает 0,39, что и получено в приведенном эмпирическом уравнении.

Под знаком натурального логарифма стоит выражение $(3,3 \cdot x + 1)$. Как явствует из (4.28), $3,3 \cdot x$ – это отношение ширины зоны активной фильтрации к ширине оградительной дамбы:

$$3,3 \cdot x = \frac{B}{b}. \quad (4.29)$$

Ширина оградительной дамбы 0,3 м. При $x = B = 1$ м получаем $3,3 = 3,3$, при $x = B = 2$ м – $6,6 = 6,6$. Справедливость выражения доказана.

Для определения в уравнении (4.18) величины B – ширины зоны влияния дренажно-сбросного канала, которая заранее неизвестна, напомним уравнение неразрывности потока в следующем виде:

$$k \cdot H \cdot b^{-1} = 2 \cdot k \cdot H \cdot \ln\left(\frac{B}{b} + 1\right) \quad (4.30)$$

Левая часть равенства отражает единичный расход, проходящий через призму $abcd$, правая – через сечение 1-1 (рисунок 4.9 а). После сокращения получим:

$$H \cdot b^{-1} = 2 \cdot H \cdot \ln\left(\frac{B}{b} + 1\right). \quad (4.31)$$

Решая это уравнение относительно B , получим:

$$B = b \cdot \left(e^{0,5 \cdot H \cdot b^{-1}} - 1\right). \quad (4.32)$$

или в десятичных логарифмах:

$$B = b \cdot \left(10^{0,22 \cdot H \cdot b^{-1}} - 1\right). \quad (4.33)$$

Как видно из (4.33), величина B не зависит от коэффициента фильтрации, т. е. от типа и водно-физических свойств грунтов, из которых сложена зона аэрации от поверхности до водоупора, а зависит от ширины оградительной дамбы b и среднего напора $H/2$.

Чтобы получить графическое представление уравнения (4.32), необходимо выразить его в безразмерных координатах B/b и H/b . Как нетрудно представить, с увеличением H величина B/b возрастает по экспоненциальной зависимости, близкой к пропорциональной.

Ранее нами с использованием методов конформного отображения было получено выражение для ширины зоны активной фильтрации (4.23). Оно отличается от формулы (4.33) показателем

степени: в первом случае это h_0 , во втором – $0,22 \cdot H \cdot b^{-1}$. Таким образом, обе формулы будут подобны в том случае, если окажется справедливым тождество

$$h_0 \equiv 0,22 \cdot H \cdot b^{-1} . \quad (4.34)$$

Для различных значений H и b по графикам П. Я. Полубариновой-Кочиной и по тождеству (4.34) нами определено значение h_0 . Результаты (таблица 4.5) оказались сходными, что указывает на приемлемость применения методов гидравлической теории, тем более что полученные решения отличаются простотой.

Таблица 4.5 – Высота высачивания h_0 для различных значений действующих напоров и ширины оградительных дамб

Параметры			Высота высачивания		Разница $\pm m$
h_1	h_2	b	по графикам П.Я. Полубариновой-Кочиной	по тождеству (4.34)	
1,5	1	3	0,19	0,188	0,002
		6	0,10	0,094	0,006
		3	0,28	0,326	0,046
2,0	1	6	0,16	0,113	0,047
		3	0,38	0,378	0,002
3,0	2	6	0,19	0,189	0,001

$$d = 0,017$$

$$S_d = 0,022$$

$$d_{\max} = 0,047$$

$$HCP_{0,5} = 0,054$$

Для двухслойных зон аэрации, где сверху залегает слабопроницаемый пласт мощностью m_1 , а снизу – сильнопроницаемый m_2 , формула (4.23) с учетом виртуального приведения действующих напоров будет иметь вид:

$$B = b \cdot \left\{ 10^{[0,22 \cdot k_2 \cdot k_1^{-1} \cdot (m_2 + h_1) + m_1] b^{-1}} - 1 \right\}. \quad (4.35)$$

В случае несовершенного дренажа его приводят к совершенному, используя (4.27).

Таким образом, задача получения математических моделей фильтрации со стороны затопленной поверхности в дренажные каналы нами успешно решена, что дает основание приступить к рассмотрению новой, дополнительной задачи, позволяющей ответить на вопрос – оказывает ли влияние растительность в междурье на величину дренажного оттока. Как в модели Дюпюи, так и в предложенных нами моделях и формулах влияние растительности не рассматривается, в связи с чем при проектировании дренажной сети рисовых систем расчеты ведут без учета развивающейся растительности, что вызывает сомнения в их обоснованности. А основания для сомнений имеются.

Корневая система риса за счет способности к десукции всасывает из почвы воду и доставляет ее в надземную часть растений, где она частично (0,15–0,20%) используется в фото- и биосинтезе, а остальная часть транспортируется в приземный слой атмосферы. Таким образом, часть воды, находящейся в порах верхнего корнеобитаемого слоя, движется вверх, в надземную часть растений благодаря возникающему разрежению, остальная вода из нижележащих слоев под действием гравитационных сил движется вниз, в сторону дренажного канала.

Представим сосущую силу корней в виде мелкого густого вакуумного дренажа (рисунок 4.10 б) и построим гидродинамическую сетку движения почвенно-грунтовых вод к этому биологическому дренажу, а также к дренажно-сбросному каналу (рисунок

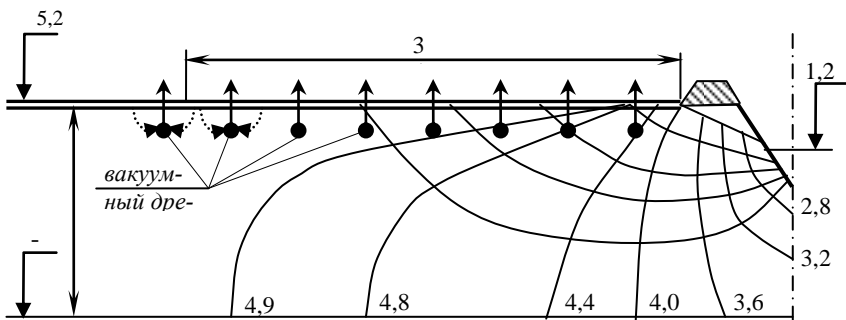
4.10 а). Суммарный расход вакуумного дренажа q_v равен транспирационному расходу посевов риса q_t , что естественно: $q_v = q_t$, а зона влияния его B равна $2 \cdot h_2$, где h_2 – глубина размещения вакуумного дренажа (в нашем случае $h_2 = 0,2$ м).

Из рисунка (4.10 а) видно, что вакуумный дренаж, находясь на пути фильтрационного потока, перехватывает часть фильтрационного расхода. Для выяснения того, как при этом будут взаимодействовать два противоположно направленных потока, рассмотрим единичную струйку потока при следующих условиях (рисунок 4.10 б): боковую поверхность струйки (трубки) будем считать водонепроницаемой; она имеет протяженность l и действующий напор H , коэффициент фильтрации k , общий для всего потока. Расход струйки трубки q_T площадью S при отсутствии вакуумного дренажа будет равен:

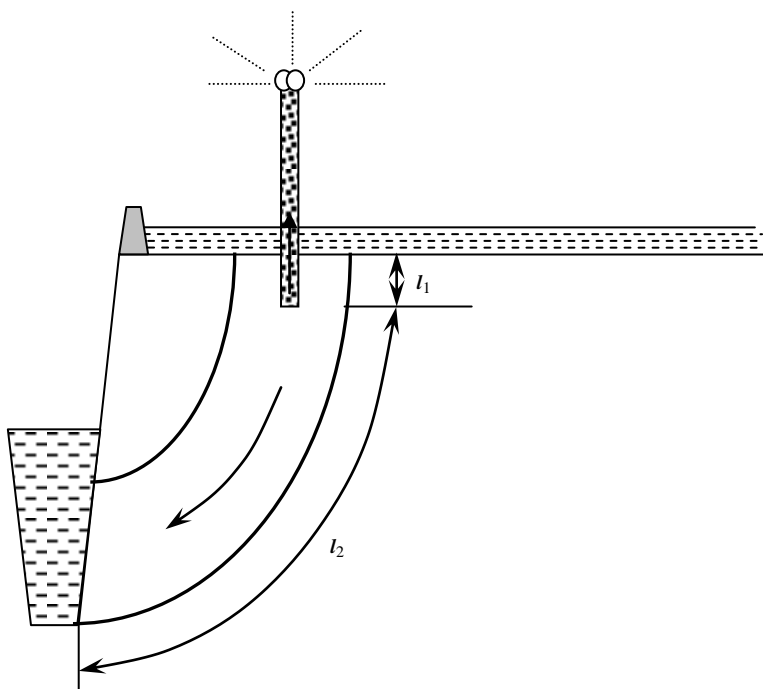
$$q_T = k \cdot \frac{H}{2} \cdot S. \quad (4.36)$$

В верхнюю часть струйки (трубки) вставим трубку меньшего диаметра, имитирующую растение с корнями. Нижняя часть этой трубки на длине l перфорирована для приема в нее фильтрационного потока, а в устье установим вакуумный насос. В этом случае возможны три варианта:

1) при $q_t < q_0$ фильтрующий поток делится на две части по направлению движения (транспирационная составляющая направлена вверх, а фильтрующая – вниз). В силу неразрывности потока $q_2 = q_0 - q_t$;



а)



б)

Рисунок 4.10 – Схема физической гидродинамической модели дренажа поливной карты (а) и единичной струйки фильтрационного потока со стороны затопленной поверхности (б)

2) при $q_t = q_0$ поток фильтрации ниже глубины залегания биологического дренажа l_2 прекращается;

3) при $q_t > q_0$ поток из дренажного канала движется вверх.

Рассмотрим, возможны ли описанные случаи в природных условиях Кубани: канал совершенный, $k = 0,3$ м/сут, $H = 2$ м, максимально возможная величина транспирации 20 мм, или $0,04$ мм³/сут на 1 п. м. длины дренажного канала. Расчеты показывают, что второй и третий случаи возможны на тяжелых глинистых грунтах с $k < 0,01$ м/сут. Однако такие гидрогеологические ситуации на рисовых системах не встречаются. Как правило, зона аэрации двухслойная, при этом коэффициент фильтрации нижнего слоя сложен из супесчаных грунтов, смешанных с ракушечником, коэффициент фильтрации в десятки раз выше вышележащих слоев.

Таким образом, дренажный отток в картовые дренажно-сбросные каналы при наличии растительности будет ниже, чем при ее отсутствии, на величину транспирационного расхода q_t . Формула (4.16) в этом случае будет иметь вид:

$$q = 2,3 \cdot k \cdot H \cdot \lg B \cdot b^{-1} - q_t. \quad (4.37)$$

Как известно, транспирация посевов риса не является величиной постоянной: в связи с нарастанием температуры воздуха от $16,5$ °С в мае до $23,7$ °С в августе, а также с увеличением индекса листовой поверхности от 0 до 4–6 она возрастает. По этой причине дренажный отток уменьшается на величину q_i . Динамика дренажного оттока за вегетационный период риса (110–120 дн) с учетом

этого явления представлена на рисунке 4.11. Из него видно, что он к концу вегетации снизился почти на 80%.

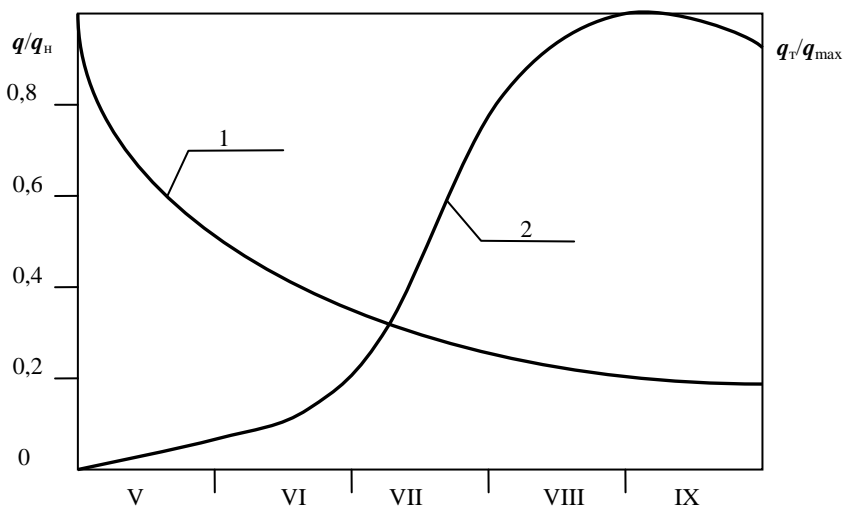


Рисунок 4.11 – Динамика дренажного оттока q (1) на рисовом поле (q_n – величина дренажного оттока в начале поливного периода) и транспирации q_t (2)

4.3 Безнапорное движение потока по горизонтальной поверхности при ламинарном режиме

На оросительных системах с культурой затопляемого риса после высева семян осуществляют затопление поверхности горизонтально спланированного чека слоем воды. В период первоначального затопления наблюдается безнапорное движение потока при ламинарном (ползущем) режиме. Вода на водовыпуске из оросителя в чек поступает в приямок глубиной, равной диаметру трубы и

длиной от 1 до 4 м (рисунок 4.12). Прямок необходим для гашения энергии потока, и если его не будет, то в нижнем бьефе сооружения происходит размыв почвы сильной струей воды с вымывом молодых растений риса.

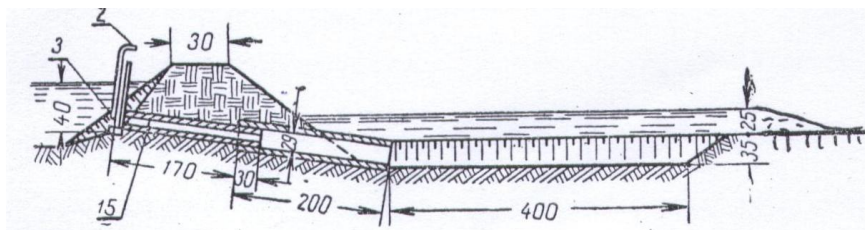


Рисунок 4.12 – Типовой водовыпуск из оросителя в чек [10]

Водовыпуски из оросителя в чек устраивают, как правило, в одном из углов чека. Фронт затопления поверхности чека в этом случае в плане представляет собой изменяющуюся во времени эллиптическую форму с полуосью, проходящей из одного угла прямоугольного чека в противоположный (рисунок 4.13). Такой вид движения воды в гидравлике не изучен совсем. Отличительные черты этого движения:

- 1) уклон дна потока равен 0;
- 2) слой воды на затопляемом чеке неодинаков во всех направлениях: наибольший имеет место у выхода потока из прямка, наименьший – на границе фронта затопления;
- 3) площадь живого сечения потока при удалении его от водовыпуска сначала увеличивается, а затем (близко от противоположной стороны чека) уменьшается;
- 4) движение воды неравномерное.

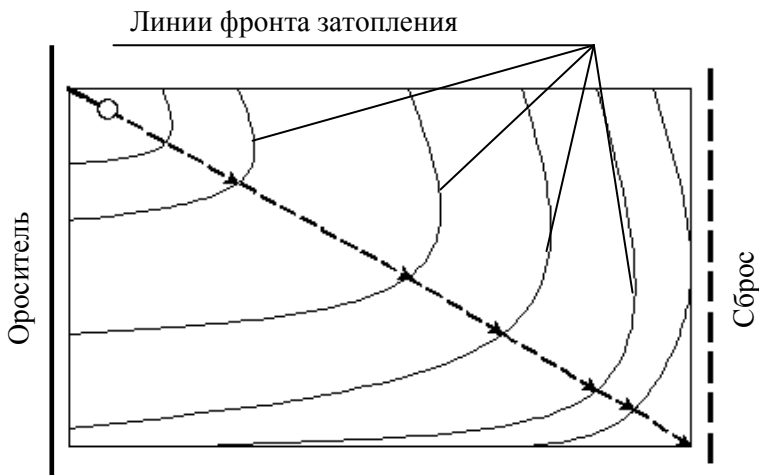


Рисунок 4.13 – Линии фронта затопления на рисовом чеке

Если к перечисленным чертам добавить, что часть объема воды, поступающей из водовыпуска в чек, впитывается в почву с расходом, напрямую зависящим от площади затопления, то становится очевидным, что математическое описание такого движения является чрезвычайно сложной задачей. Однако данная степень изученности проблемы позволяет установить и получить важные для практики сведения. В частности, вывести функционально-эмпирическое уравнение для определения продолжительности затопления поверхности чека определенным слоем $h_{ст}$.

Как известно, уровень грунтовых вод (УГВ) в межполивной период под рисовой оросительной системой располагается близко от поверхности земли (1,0–1,5 м), в связи с чем к концу затопления чека поверхностные и грунтовые воды смыкаются, и зона аэрации,

по выражению В. Б. Зайцева [10], представляет собой «сплошное водное тело». Объем воды W , ушедшей на образование этого тела, может быть определен по формуле [34]:

$$W = 1 \cdot 10^4 \alpha \cdot H_0 \Pi, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (4.38)$$

где H_0 – исходная глубина залегания (в расчетах принимается равной норме осушения в межполивной период), м;
 α – недостаток насыщения почвогрунтов в долях от общей порозности (для тяжелых суглинистых почв $\alpha=0,08-0,12$, для средних и легких $0,13-0,20$);
 Π – общая порозность в долях от объема (изменяется от $0,40$ для суглинистых и глинистых безгумусовых почв, до $0,60$ – для гумусовых почв пахотного слоя).

Объем воды на создание слоя определяется по формуле

$$W_{\text{сл}} = h_{\text{сл}} \cdot F, \text{ м}^3,$$

где F – площадь чека, м^2 . Для одного гектара $F = 10000 \text{ м}^2$.

Поскольку расход воды Q из оросителя в чек является величиной постоянной, то отсюда продолжительность затопления T определяется формулой

$$T = \frac{W_{\Pi} + W_{\text{сл}}}{Q}.$$

Если принять $H_0 = 1,5$ м, $\alpha = 0,10$, $\Pi = 0,50$, $Q = 10$ л/с·га, то

$$T = \frac{10000 \cdot 0,1 \cdot 1,5 \cdot 0,50 + 0,1 \cdot 10000}{86400 \cdot 0,01} = \frac{1750}{864} \approx 2,0 \text{ сут.}$$

4.4 Гидродинамика взаимодействия поверхностных и грунтовых вод

Значительная часть рисовых систем России размещена в приморских низменностях на заболоченных землях (плавни, рисунок 4.14) с близким залеганием сильноминерализованных (16–18 г/л) грунтовых вод [38].

Несмотря на устройство глубокой коллекторно-дренажной водоотводной сети и орошение риса пресными речными водами, при существующих параметрах орошения (3–5 л/с*га) и технике первоначального затопления посевов избежать повышенного содержания солей в поверхностных водах и пахотном слое почвы не удается. Урожайность риса в этих условиях в 1,5-2 раза ниже, чем на участках, находящихся вне зоны влияния морей (таблица 4.6). Повышенное содержание солей в период первоначального затопления получило название «ирригационное засоление» [40].

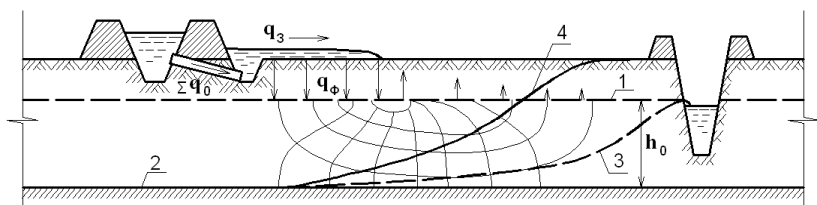
Таблица 4.6 – Минерализация воды (г/л) на различных элементах поливных карт и урожайность риса [55]

Рисовая система и ее удаленность от моря	Элемент поливной карты	Месяц					Урожайность, т/га
		V	VI	VII	VIII	IX	
Кубанская (50 км)	Ороситель	0,39	0,35	0,30	0,29	0,44	6,33
	Чек	0,57	0,62	0,40	0,30	0,32	
	Скважина	0,46	0,48	0,38	0,47	0,42	
Черноерковская (примыкает к морю)	Ороситель	0,21	0,20	0,28	0,32	0,30	3,72
	Чек	0,72	0,65	0,47	0,68	0,42	
	Скважина	3,70	2,30	1,50	1,90	1,80	

Данные, представленные в таблице 4.6, объясняют причины столь существенной разницы в урожаях, однако кинетика и механизм взаимодействия пресных поверхностных и грунтовых мине-

рализованных вод, приводящих к ирригационному засолению, остаются своеобразным «черным ящиком», без расшифровки которого разработка действенных методов предупреждения ирригационного засоления почв остается неосуществимой.

Для его «раскрытия» рассмотрим кинетику поверхностных и грунтовых вод на графической модели поливной карты (рисунок 4.15).



q_0 – расход из оросителя в чек (величина постоянная); q_ϕ – расход на впитывание и фильтрацию; $q_з$ – расход, идущий на затопление поверхности чека; 1 – положение уровня грунтовых вод; 2 – положение водоупора; 3, 4 – теоретические кривые раздела пресных и соленых вод при $q_0 = 50 \text{ л/с}\times\text{га}$ и $q_0 = 10 \text{ л/с}\times\text{га}$ соответственно

Рисунок 4.15 – Поперечный разрез поливной карты с гидродинамической сеткой движения грунтовых вод

Как показано на рисунке 4.15, вода из оросителя поступает в чекую канавку и после ее переполнения разливается по поверхности чека, двигаясь широким фронтом от картового оросителя к сбросу.

При этом поток раздваивается: часть его ($q_з$) движется по поверхности в горизонтальном направлении, другая (q_ϕ) – вертикально вниз (фильтрационный поток). Последний, сомкнувшись с по-

верхностью грунтовых вод, оказывает на них гидростатическое давление, в связи с чем УГВ поднимается под незатопленной частью поверхности чека. Расход поверхностного потока определяется выражением

$$q_3 = q_0 - q_\phi = q_0 - K_\phi \times \omega, \quad (4.37^*)$$

где K_ϕ – коэффициент впитывания (фильтрации);

ω – площадь затопленной поверхности.

Таким образом, с увеличением площади затопленной поверхности $q_3 \rightarrow 0$ и при равенстве ($q_0 = q_\phi$) затопление прекращается и наблюдается потенциально-динамическое равновесие: вся поступающая из оросителя вода уходит полностью на фильтрацию, вызывая подъем УГВ. Когда грунтовые воды достигают поверхности чека, фильтрационный поток, утрачивая напор, прекращается, и поверхность быстро затапливается слоем пресной воды. Таким образом, смыкание пресной и сильноминерализованной воды происходит на поверхности чека, в связи с чем вследствие диффузии поверхностный слой воды также засоляется.

Вызывает интерес расположение пресной и минерализованной воды под поверхностью почвы относительно линии раздела: пресная располагается над линией, создавая пресную водяную подушку, минерализованная – под нею. Для вывода уравнения линии раздела воспользуемся известной в математике функцией роста [47]:

$$\frac{dh}{dt} = \mu(h), \quad (4.38)$$

где h – ордината уровня грунтовых вод;
 μ – удельный темп роста.

Удельный темп роста μ зависит от величин K_ϕ , q_0 и исходной глубины залегания УГВ – h_0 .

Примем следующие ограничения и допущения:

- 1) поверхность чека строго горизонтальная;
- 2) темп роста пропорционален гидромодулю полива;
- 3) коэффициент впитывания является величиной постоянной.

После интегрирования и некоторых преобразований получаем выражение:

$$h = h_0(e^{\mu t} - 1). \quad (4.39)$$

Графическое представление этого уравнения отражено на рисунке 4.15 (позиции 3 и 4). Выражение (4.39) выведено на основе идеализированных условий, которые в производстве практически не встречаются. В частности, на рисовых системах нет идеально спланированных чеков, имеются микропонижения (рисунок 4.16).

Вода в этом случае двигается не широким фронтом от оросителя к сбросному каналу, а затапливает микропонижения, вокруг которых и формируются зоны ирригационного засоления. Однако их гидродинамическая сущность остается без изменения.

43	40	61	48	39	38	25	37
38	46	41	45	41	41	42	47
38	45	41	44	35	38	42	51
43	41	43	43	41	39	47	61
42	39	41	41	41	42	33	57
41	37	43	43	43	33	35	47
47	41	39	39	39	34	40	57
43	50	42	44	41	40	45	59
41	44	43	45	41	35	46	54
43	47	40	41	38	35	40	50
41	41	43	33	38	40	42	47
43	48	45	40	36	39	42	51
45	52	43	42	38	39	40	54
44	42	43	41	41	39	43	60
43	44	41	46	47	43	41	53
45	48	43	41	43	41	46	53
41	47	43	40	45	39	45	53
39	40	38	40	40	40	42	51
40	45	38	41	41	36	38	56
38	45	37	43	39	40	37	56
41	44	45	42	38	35	51	51
37	41	42	42	35	35	31	53
35	43	38	39	38	39	35	45
35	43	41	38	43	41	41	47
38	43	43	45	41	41	46	48
40	45	45	35	38	38	37	45
48	51	55	50	41	35	38	40

Микропонижения

Рисунок 4.16 – Картограмма нивелирной съемки поверхности рисового чека

Техника первоначального затопления, позволяющая снизить или даже избежать ирригационного засоления, определяется уравнением (4.37*): если в нем увеличить гидромодуль полива в n раз,

то и расход, и как следствие, скорость затопления увеличится во столько же раз (форсированное затопление).

Исследования влияния форсированного затопления на динамику воды и урожайность риса проведены [40] на новой системе рисосовхоза «Новопетровский» Славянского района Краснодарского края с исходным засолением почв $0,5 \div 0,7$ г на 100 г сухой почвы. На трех поливных картах были выбраны шесть чеков, в трех из них установили дополнительные водовыпуски с общим расходом $45 \div 50$ л/с·га каждый, на оставшихся их было по одному с расходом $10 \div 12$ л/с·га. Исследования показали, что продолжительность первоначального затопления чеков на форсированном затоплении оказалась примерно на 70 ч короче, чем при обычном. Смыкание поверхностных и грунтовых вод произошло на глубине около 0,3 м, получены густые всходы риса (248 раст./м² против 121 на контроле). В опытах было установлено, что высококачественная планировка поверхности чека и предполивная глубина залегания грунтовых вод играют существенную роль в предотвращении ирригационного засоления: чем ровнее чек и глубже залегают грунтовые воды, тем меньший расход поливной воды потребуются для достижения опережающих темпов первоначального затопления.

В наших опытах прибавка урожайности составила 0,9 т/га (таблица 4.7), но она могла быть выше, если бы в первый год эксплуатации на системе была проведена промывка почв.

Таблица 4.7 – Темпы поверхностного затопления (числитель) и подъем уровня грунтовых вод (знаменатель) в процентах от общей площади и исходной глубины залегания УГВ

Номер карты	Вид затопления	Время от начала подачи воды, ч				Минерализация грунтовых вод, г/л	Урожайность, т/га
		8	16	48	90		
297, 337, 356	Форсированное	$\frac{87}{0}$	$\frac{100}{0}$	–	–	1,0	5,0
	Обычное	$\frac{41}{19}$	$\frac{57}{35}$	$\frac{91}{95}$	$\frac{93}{100}$	4,3	4,1

Без промывки почвогрунтов зоны аэрации форсированное затопление не смогло в один год полностью их рассолить: содержание солей было высокое – $0,5 \div 0,7\%$ на 100 г сухой почвы. В наших опытах рассоление верховодки было существенно выше, чем при обычном затоплении, однако минерализация воды в ней в пределах от 0,96 до 1,80 г/л угнетала развитие растений.

Гидрологическая и биологическая эффективность форсированного затопления очень высока: 1) ирригационное засоление пахотного слоя исключается, так как смыкание поверхностных и грунтовых минерализованных вод происходит на глубине 0,5-0,8 м от поверхности чека (кривая 2 на рисунке 4.15); 2) водная пресная подушка под чеком сохраняется в течение всего поливного периода; 3) происходит опреснение грунтовых вод; 4) подавляется развитие сорной растительности на 40–60 %; 5) всходы получают густые (250–300 раст./м²), а урожай – высокие.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АГРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Связь водопотребления с испаряемостью и густотой растений

Целью проведенных исследований было определить влияние агрометеорологических условий на рост и развитие перспективных сортов риса, а также на их водопотребление.

В задачу исследований входило:

- изучить особенности роста, развития и продуктивности новых сортов риса (Хазар, Лиман, Лидер) в связи со складывающимися метеорологическими условиями;

- изучить водопотребление растений новых сортов риса в течение вегетационного периода;

- установить влияние метеорологических факторов на водопотребление риса;

- определить величину водопотребления в зависимости от густоты стеблестоя.

Работы проводились на рисовых чеках в сосудах-испарителях ГГИ-3000 (рисунок 5.1).

В месте установки сосудов поверхность чека тщательно планировалась на отметке средней плоскости чека. Испарители устанавливали с таким расчетом, чтобы уровни почвы в них и в чеке совпадали. Затем в сосудах создавали слой воды – постоянный в течение всей вегетации (высота борта над слоем 10 см). Испарители устанавливались на расстоянии 1,0 м борт от борта.

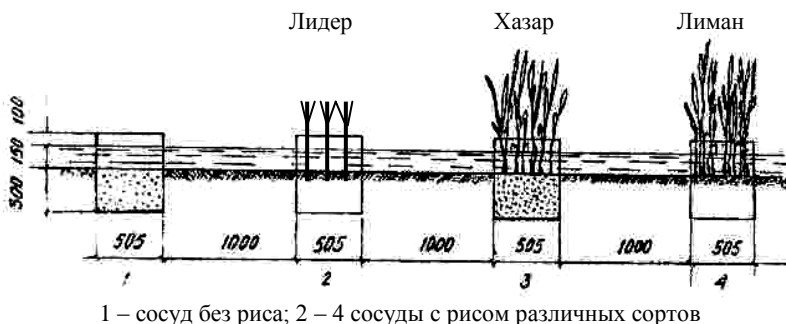


Рисунок 5.1 – Схема комплекта сосудов-испарителей

Для сосудов-испарителей устраивали котлованчики соответствующей глубины. Дну их придавали коническую форму в соответствии с конструкцией ГГИ-3000. Во избежание осадки и перекосов грунт на дне тщательно трамбовали.

В период поддержания слоя воды в чеке он должен быть постоянным и соответствующим принятому для сосудов. На оросителе устанавливали водовыпуск-автомат, обеспечивающий постоянство уровня воды в чеке, а в водовыпуске из чека в сброс устанавливали порог (шандорки).

Время исследований: май – сентябрь 2006 г.

Посев риса произведен 28 мая. Залив осуществлен сразу после посева. Повторность опыта – трехкратная.

Наблюдения проводились ежедневно. Определялись: испарение с чистой водной поверхности сосуда и суммарное испарение (испарение + транспирация) из сосудов, занятых растениями сортов Хазар, Лиман, Лидер.

Опыт проводился по следующей схеме:

I вариант – сорт риса Лидер (сосуды № 1, 2, 3)

II вариант – сорт риса Хазар (сосуды № 5, 6, 7)

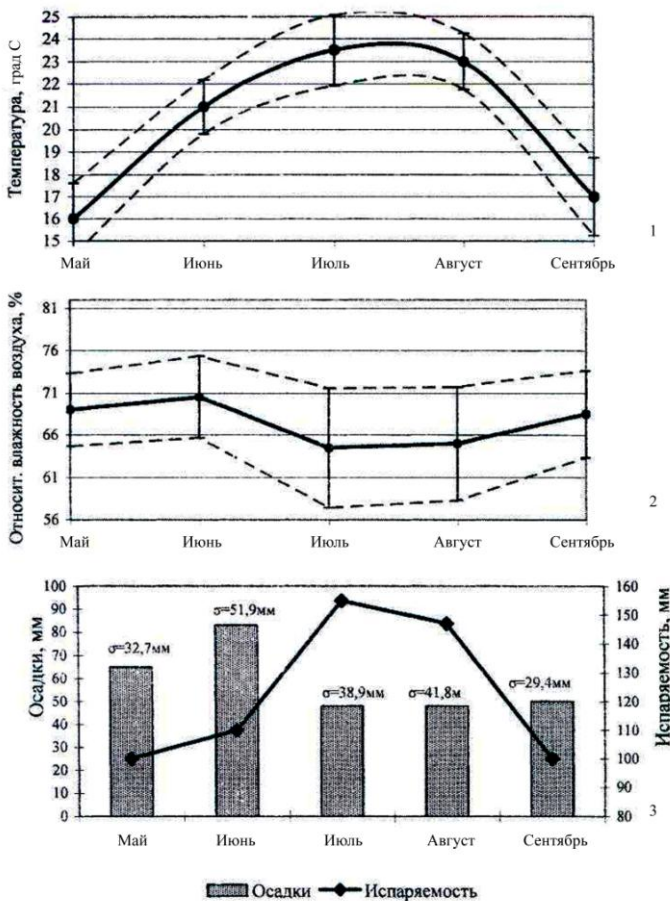
III вариант – сорт риса Лиман (сосуды № 8, 9, 10).

Для наблюдения за испарением использовался сосуд № 4 (без растений). Для измерения количества выпавших осадков использовался установленный тут же на опытной площадке почвенный осадкомер. Сосуды были установлены на одной отметке.

Перед установкой испарители были проверены. Разница в показателях получена незначительная. Сосуды заглубляли в почву таким образом, чтобы их верхние края были строго горизонтальны и возвышались над средней условной отметкой на 25 см. Расстояние между сосудами приняли равным 100 см с таким расчетом, чтобы в промежутках установить мостки для проведения наблюдений.

В годы проведения исследований погодные условия находились в пределах среднеголетних значений (рисунок 5.2).

В лизиметрах поддерживали слой затопления, равный 5 см до кущения и 15 см – после этой фазы. Всходы получали по увлажненной почве без слоя воды. Контроль за уровнем осуществлялся по гидрометрической игле, установленной в сосуде, учет испарения – объемным методом. Долив производился ежедневно в 13⁰⁰ после создания слоя воды.



1 - температура воздуха, 2 – относительная влажность, 3 – осадки и испаряемость (пунктирными линиями показаны их среднеквадратические (стандартные) отклонения)

Рисунок 5.2 – Климатические условия вегетационного периода риса на Кубани

Помимо этого, проводились фенологические наблюдения, наблюдения за температурой и влажностью воздуха на высоте 0,5 м

над уровнем почвы, температурой поверхности воды, а также за температурой слоя почвы на глубинах 0, 5, 10, 15 см. Наблюдения осуществлялись согласно методике агрометеорологических наблюдений на рисовых полях [44].

Согласно принятой классификации экологических факторов, зона рисосеяния Краснодарского края по приходу фотосинтетически активной радиации (ФАР) и температуре воздуха относится к I категории, т. е. условия энергообеспеченности продукционного процесса растений оптимальные или близкие к ним, рост и развитие риса в этом случае количеством ФАР не лимитируются.

Вегетационный период риса, начавшийся 28 мая 2006 г. и закончившийся 17 сентября для сортов Хазар и Лиман и 29 сентября – для сорта Лидер, характеризовался температурным режимом, близким к среднему многолетнему распределению температуры. Сумма активных температур составила 2389,0 °С, эффективных – 593,1 °С.

Проращивание зерна проходило на фоне пониженных температур воздуха. Средняя температура воздуха в этот период была 14,8 °С на метеоплощадке и 14,5 °С – в чеке. Минимальная температура воздуха опускалась до 5,6 °С. Пониженный температурный фон сказался на продолжительности проращивания, которое вместо четырех дней заняло шесть. Сумма эффективных температур в этот период составила всего 6,3 °С.

В период налива зерна от восковой до полной спелости также было отмечено падение температуры ниже биологического минимума данной фазы. В частности, минимальная температура воздуха

опускалась до 3,1 °С, что увеличило продолжительность созревания и отрицательно повлияло на структуру урожая: процент пустых зерен увеличился до 25–40 %. Во все остальные межфазные периоды не было отмечено каких-либо температурных аномалий, которые могли бы оказать существенное влияние на рост, развитие и продуктивность риса.

Относительная влажность во время созревания колебалась от 60 до 80 % на метеоплощадке и от 70 до 90 % – в чеке. Продолжительность вегетационного периода составила 113 дн для сортов Хазар и Лиман и 125 – для сорта Лидер.

Прошедший год в целом был благоприятным для произрастания и формирования урожая риса исследуемых сортов.

Испарение с чистой водной поверхности, транспирацию, эвапотранспирацию определяли от залива чека водой до полной спелости зерна. Период затопления у сортов Хазар, Лиман был 113 дн, у сорта Лидер – 116 дн. В первом случае испарение с чистой водной поверхности составило 293,8 мм, во втором – 297,2 мм. Суммарное испарение каждого из сортов определялось во всех случаях количеством стеблей: с увеличением их числа оно возрастало. У сорта Хазар суммарное испарение колебалось от 470,2 мм при 94 стеблях в конце вегетации до 660,1 мм при 170 стеблях; у сорта Лиман – от 544,5 мм при 104 стеблях до 678,6 мм при 196 стеблях; у сорта Лидер: от 686,1 мм при 131 стебле до 989,3 мм при 200 стеблях (таблица 5.1).

Испарение с чистой водной поверхности в начале вегетации в большей степени зависело от температуры воды и воздуха. По мере

смыкания травостоя испарение снижалось и в период от выметывания до полной спелости достигло наименьших значений, находясь в зависимости и от таких факторов, как относительная влажность и дефицит влажности воздуха.

Интенсивность транспирации увеличивалась по мере роста и развития растений, достигая своего максимума в период «выметывание – молочная спелость». Количество транспирированной растениями воды находилось в зависимости от количества стеблей, т. е. определялось густотой стеблестоя. Обнаружены сортовые различия в водопотреблении длинностебельных и короткостебельных сортов: при одинаковом исходном количестве стеблей и примерно одинаковом числе стеблей в конце вегетации длинностебельный сорт Лидер значительно превосходил по величине транспирации и эвапотранспирации короткостебельные сорта Хазар и Лиман.

Существенная разница между испарением и суммарным испарением началось с первой декады июля, т. е. в период кущения, независимо от сорта. Наибольшая разница – 200 мм: у сорта Лидер – 112 мм, у сорта Хазар – 115 мм. У сорта Лиман интенсивность данных процессов отмечена во вторую и третью декады августа, т. е. в период «выметывание – молочная спелость» (таблица 5.1).

Как видно из таблицы 5.1, показатели испарения из сосудов с рисом и без растений в первые примерно 40 дн оказались близкими друг другу и равными испаряемости. Затем в сосудах с растениями под их пологом оно стало снижаться и к концу вегетационного периода уменьшилось почти на 60 %.

Таблица 5.1 – Динамика испарения и эвапотранспирации по декадам, мм, сопутствующие метеорологические факторы (по наблюдениям в 13⁰⁰ ч в чеке)

Номер сосуда	Сорт	Кол-во стеблей		Май	Июнь				Июль			Август			Сентябрь		Итого
		исходное	в конце вегетации	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II		
4	Без растений	–	–	10,8	37,4	42,7	45,0	42,2	33,4	19,4	15,9	12,5	13,1	10,4	1,9	293,6	
	В среднем за сутки			2,7	3,7	4,3	4,5	4,2	3,3	1,8	1,6	1,2	1,2	1,0	1,5	–	
1	Лидер	40	131	12,5	36,0	38,0	43,8	43,7	48,1	37,6	60,0	93,6	135,0	68,5	37,2	654,0	
2	Лидер	80	146	13,7	39,9	39,6	44,8	47,6	56,9	54,1	86,2	131,5	178,9	76,5	39,2	808,9	
3	Лидер	120	200	13,2	43,1	40,2	45,0	51,3	60,4	60,9	110,8	158,9	213,3	98,8	50,4	946,3	
5	Хазар	40	94	13,8	37,2	39,7	45,2	44,2	41,7	31,4	40,6	55,1	72,2	29,7	19,3	470,1	
6	Хазар	80	128	12,8	38,0	39,3	45,3	45,0	47,4	33,7	51,8	65,2	81,8	32,0	21,0	513,3	
7	Хазар	120	170	12,5	41,6	40,0	44,4	48,8	56,9	47,6	65,9	96,6	125,0	43,7	36,8	659,8	
8	Лиман	40	104	12,4	43,6	40,8	46,8	47,7	47,8	32,9	46,7	68,2	91,4	38,5	27,6	544,4	
9	Лиман	80	178	12,8	44,0	41,5	45,9	49,8	55,5	42,5	63,2	93,0	125,9	48,4	28,6	651,1	
10	Лиман	120	196	13,6	45,4	42,2	46,2	52,3	58,9	47,1	69,6	100,0	127,7	48,3	27,3	678,6	
Ср. декадн. t воздуха град. С: 2,0 м метео				14,5	20,0	20,6	22,3	23,1	23,6	21,6	23,2	24,6	24,4	21,0	14,7	–	
0,5 м чек				14,2	19,3	20,1	21,6	21,7	22,1	19,9	21,0	22,0	21,3	18,8	13,7	–	
Ср. декадн. t пов. воды, град.С				20,4	25,2	27,0	31,3	28,8	25,5	23,9	23,7	24,0	22,3	21,0	17,2	–	
Абс. максимум t пов. воды, град. С				22,2	33,5	35,1	36,2	35,1	33,1	28,7	29,7	28,8	27,7	25,9	23,0	–	
Абс. минимум t пов. воды, град. С				8,2	11,6	16,7	17,6	18,0	19,1	19,1	19,1	20,2	19,7	18,9	13,5	–	
Температура почвы, град. С			0 см	20,0	23,4	25,1	29,6	26,6	24,0	21,6	22,1	22,0	20,6	19,6	16,0	–	
			5 см	16,5	20,0	22,5	26,2	23,6	22,6	21,1	21,8	21,8	20,6	19,8	16,7	–	
			10 см	14,8	18,3	21,2	24,1	22,3	22,0	20,7	21,4	21,6	20,4	19,6	17,1	–	
			15 см	14,2	17,5	20,7	22,7	21,8	21,9	20,7	21,3	21,5	20,4	19,6	17,5	–	
Ср. декадн. влажн. воздуха: 2,0 м метео				–	–	–	–	–	–	–	–	66	63	79	79	–	
Ср. декадн. дефицит влажн. воздуха 2,0 м метео				–	–	–	–	–	–	–	–	10,4	11,3	5,2	3,6	–	

Таким образом, результаты наших теоретических исследований (п. 4.1) получили экспериментальное подтверждение.

На основании данных таблицы 5.2 нами построен график транспирации сортов Лидер и Хазар (рисунок 5.3).

Таблица 5.2 – Динамика показателей транспирации растений риса сортов Лидер и Хазар, мм

Номер сосуда	Сорт	Кол-во стеблей		Июль			Август			Сентябрь		Всего	Урожай, т/га
		исходное	в конце вегетации	I	II	III	I	II	III	I	II		
1	Лидер	40	131	1,5	14,7	18,2	44,1	81,1	121,9	58,1	53,8	393,4	3,9
2	Лидер	80	146	5,4	23,5	34,7	70,3	119,0	165,8	66,1	61,4	546,2	5,5
3	Лидер	120	200	9,1	27,0	41,5	94,9	146,4	200,2	88,4	79,0	686,5	6,9
5	Хазар	40	94	2,0	8,3	12,0	24,7	42,6	59,1	19,3	8,4	176,1	2,6
6	Хазар	80	128	2,8	14,0	14,3	35,9	52,7	68,7	21,6	10,1	220,1	3,3
7	Хазар	120	170	6,6	23,5	28,2	50,0	84,1	111,9	33,3	25,9	363,5	5,5
8	Лиман	40	104	5,5	14,4	13,5	30,8	55,7	78,3	28,1	16,7	243,0	3,6
9	Лиман	80	178	7,6	22,1	23,1	47,3	80,5	112,8	38,0	17,7	349,1	5,2
10	Лиман	120	196	10,1	25,5	27,7	53,7	87,5	114,6	37,9	16,4	373,4	5,6

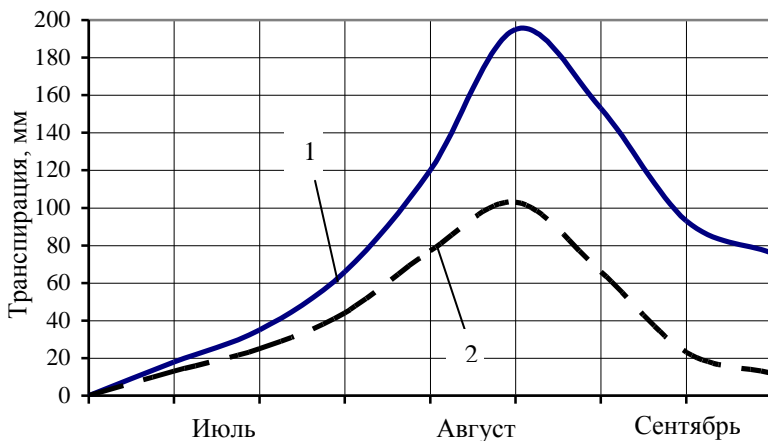


Рисунок 5.3 – Динамика транспирации растений позднеспелого сорта Лидер (1) и среднеспелого сорта Лиман (2)

Из рисунка 5.3 видно, что в графическом виде ход транспирации представляет собой дифференциальную кривую Гаусса, как мы и предполагали теоретически.

Краткие выводы

1. Продолжительность периода вегетации длинностебельного сорта Лидер на 12 сут больше, чем у короткостебельных сортов Хазар и Лиман.

2. Продолжительность затопления – 116 дн у сорта Лидер, 113 дн – у сортов Хазар и Лиман.

3. Интенсивность транспирации в основном зависит от количества стеблей, фазы развития растений, температурных условий. Транспирация максимальна в период «выметывание – молочная спелость».

4. Эвапотранспирация начинает превышать испарение с чистой водной поверхности начиная с периода кущения и до конца вегетации, при этом величина испарения ниже показателя испаряемости.

5. Обнаружены сортовые различия в водопотреблении: у длинностебельного сорта интенсивного типа Лидер оно в среднем за период вегетации составило 803,2 мм, у сортов Хазар и Лиман – 548,0 и 626,3 мм соответственно.

6. Графики водопотребления сортов, построенные по данным таблицы 5.1, существенно различаются.

7. Экспериментальные исследования подтвердили обоснованность теоретических разработок: коэффициент корреляции (сходимость) 0,96–0,98.

5.2 Влияние транспирации на величину дренажных потерь

Для установления влияния транспирации на величину дренажных потерь на Курчанской рисовой оросительной системе выбрали один дренажно-сбросной канал. Наблюдения за расходом воды проводили в период с 1 июля по 31 августа (2 мес, 6 дек). Учет объемов воды осуществляли с помощью гидрометрической вертушки ГР-55.

На площади, прилегающей к дренажно-сбросному каналу, был посеян рис сорта Лиман, в связи с чем величину транспирации посевов приняли по данным таблицы 5.2.

В период наблюдений затворы на чековых дренажно-сбросных сооружениях были плотно закрыты для исключения сброса воды с рисовых чеков. Транспирацию и расход воды измеряли в миллиметрах. Результаты учета представлены в таблице 5.3.

Для отображения сходимости результатов учета они представлены в том числе и в безразмерной системе координат. Расчеты показали, что сходимость очень высокая: коэффициент корреляции $\eta = 0,96 \pm 0,021$.

Таблица 5.3 – Динамика дренажного стока и транспирации за период с 1 июля по 31 августа (2008 г.)

Вид потерь воды	Июль			Август		
	I	II	III	I	II	III
Дренажный сток:						
мм	3,5	3,3	2,0	1,8	1,3	0,5
доля от максимального значения	1,0	0,94	0,63	0,51	0,37	0,14
Транспирация:						
мм	5,5	14,4	13,5	30,8	55,7	78,3
доля от максимального значения	0,02	0,18	0,30	0,39	0,71	1,00
1-Т _{уд}	0,98	0,82	0,70	0,61	0,29	0,0

5.3 Влияние ширины междурядий посевов на водопотребление и урожайность риса

Опыт проведен на чеке 1 карты 5 экспериментального орошаемого участка ВНИИ риса. Опытный чек разделили на две части: на одной посеян рис сорта Лиман, на второй – Хазар.

Сев каждого сорта риса был проведен по двум вариантам с одинаковой площадью посевов: 1) узкорядный (рядовой) с шириной междурядья 15 см; 2) широкорядный – 30 см.

Сроки посева и затопления, подготовка почвы, агротехника и режим орошения (постоянное затопление слоем 12–15 см) были одни и те же. Ширину защитных полос по границам чека для исключения влияния краевого эффекта приняли равной 6 м.

Учет урожая и биометрический анализ его структуры показали, что ширина междурядий оказывала различное влияние на величину урожая: у сорта Лиман на узкорядном посеве он оказался вы-

ше, чем на широкорядном, а у сорта Хазар – наоборот, ниже (таблица 5.4). Более высокий урожай сорта Хазар обеспечила высокая кустистость.

Таблица 5.4 – Структура урожая риса сортов Лиман и Хазар при различной ширине междурядий (полевой опыт, 2006, ВНИИ риса)

Сорт	Способ посева	Высота растений, см	Структура урожая			
			КПК	масса зерна с 1 растения, г	пустозерность, %	масса 1000 зерен, г
Лиман	Обычный рядовой	76	2,7	8,3	13,9	28,2
	Широко-рядный	70	1,9	4,9	7,3	27,7
Хазар	Обычный рядовой	90	3,2	10,4	23,9	25,8
	Широко-рядный	84	4,0	13,1	13,0	27,1

Более высокая биологическая продуктивность водопотребления риса у сорта Хазар объясняется двумя причинами:

1) сорт отличается от Лимана тем, что у него куст компактный, прямостоячий, метелка вертикальная непоникающая, сорт устойчив к полеганию. Благодаря этим признакам обеспечивается более высокий вертикальный турбулентный обмен паров воды в травостое;

2) компактность куста и неполегамость обеспечили сорту не только вертикальный, но и боковой турбулентный парообмен (аэрация). Все вместе взятое оказало существенное влияние на де-

фицит влажности в травостое при более широких междурядьях (таблица 5.5), и как следствие, более высокую урожайность.

Таблица 5.5 – Дефицит влажности воздуха (мм) в период после смыкания травостоя

Сорт	Ширина междурядий, см	Фаза вегетации				Испаряемость, мм
		выход в трубку	выметывание	молочно-восковая спелость	восковая спелость	
Хазар	30	10,8	11,5	9,7	4,8	182
Лиман	30	5,9	6,4	5,0	2,7	104

5.4 Террасность рисовых чеков и ее влияние на режим грунтовых вод и урожайность риса

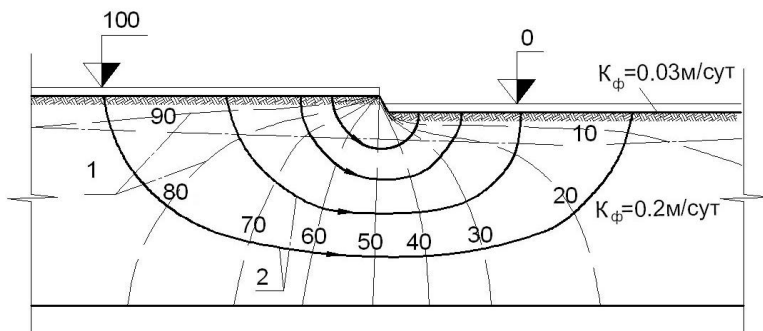
Строительство оросительных систем для возделывания культуры затопляемого риса неизбежно связано с террасированием природного рельефа с превращением его склонов в огромное множество горизонтально спланированных и ступенчато расположенных рисовых чеков. В странах традиционного рисосеяния величина перепадов отметок между их плоскостями не более 0,10 м (см. рисунок 2.1). Если учесть, что грунтовые воды под склонами находятся глубоко под поверхностью земли, то гидравлическая связь между смежными чеками (верхним и нижним) существовать не может: просочившаяся вертикально вглубь почвы вода частично используется корнями растений, частично испаряется и только у подошвы склона какое-то ее количество может опуститься на поверхность грунтовых вод. На смежный чек она не попадает.

Совсем другая картина наблюдается в дельтах рек с вогнуто-выпуклой поверхностью мезорельефа и близким (0,5–1,5 м) залеганием грунтовых вод (рисунок 5.4): с уверенностью можно предположить, что после затопления рисовых чеков и смыкания поверхностных и грунтовых вод вода с верхнего чека будет фильтроваться в нижний, прилегающий.



Рисунок 5.4 – Приазовские плавни до строительства оросительных систем

Исследования по методу ЭГДА подтвердили это (рисунок 5.5) и показали, что объем фильтрации тесно коррелирует с величиной перепада отметок между плоскостями чеков (так называемая террасность чеков). Наши исследования показали, что она в приморских низменностях (дельтах рек) достигает 0,8–0,9 м, кроме Приханкайской (Приморье), где она не превышает 0,28 м (таблица 5.6).



1 – линии равных напоров (% от общего перепада напоров); 2 – линии тока

Рисунок 5.5 – Гидродинамическая сетка фильтрации из высокого чека в низкий

Таблица 5.6 – Величина террасности (м) на рисовых оросительных системах (по данным обследований, проведенных в 1971-1973 гг.)

Рисовая оросительная система, хозяйство	Средняя по системе величина террасности		Максимальная величина террасности	
	положит.	отрицат.	положит.	отрицат.
Приазовская (Краснодарский край)	0,62	0,54	1,08	0,96
Черноерковская (Краснодарский край)	0,24	0,21	0,69	0,70
Петровско-Анастасиевская (Краснодарский край)	0,19	0,16	0,39	0,37
Совхоз «Горьковский» (ДагАССР)	0,16	0,14	0,84	0,52
Совхоз «Жемчужный» (Приморский край)	0,12	0,10	0,28	0,16

Террасность чеков до выхода в свет отраслевого стандарта ОСТ 33.6-73 не входила в круг мелиоративных проблем. Величину перепада отметок между чеками при проектировании и строительстве рисовых систем практически не ограничивали. В основу вывода об актуальности постановки вопроса легли наши исследования

[27], которые на фактах почечкового учета урожайности (таблица 5.7) убедительно показали, что террасность является причиной ее пестроты и значительных недоборов зерна риса. Они оценены в 8 %, что при современном уровне агротехники соответствует 0,3-0,6 т с 1 га.

Таблица 5.7 – Высотное положение чеков и урожайность риса в ЭСХ «Красное» Краснодарского края

Номер карты	Номер чека	Площадь чека, га	Геодезическая отметка, м	Урожайность, т/га				
				1968 г.	1969 г.	1970 г.	1971 г.	Сред. за 2 года
2	1	2,06	7,37	5,87	Многолетние травы		9,12	7,50
	2	2,23	7,22	5,51		6,19	5,85	
	3	2,67	7,39	4,42		4,26	4,45	
	4	1,58	7,91	6,13		13,59	9,85	
	5	2,60	7,58	5,86		7,36	6,61	
	6	2,11	7,53	6,63		10,30	8,46	
	7	2,60	7,46	7,09		5,06	6,07	
3	1	2,06	7,56	Многолетние травы	4,37	7,75	Многолетние травы	6,06
	2	1,88	7,42		4,52	5,65		5,10
	3	1,74	7,16		2,13	3,80		2,95
	4	1,74	7,25		2,92	4,30		3,60
	5	1,05	7,65		4,80	7,83		6,30
	6	2,47	7,16		4,00	3,99		4,00
	7	3,11	7,67		4,30	5,87		5,10
6	1	4,02	7,99	Многолетние травы		6,68	8,24	7,46
	2	3,16	7,92			5,17	6,45	5,81
	3	3,16	7,78			5,70	5,89	5,79
	4	4,53	7,80			6,31	8,85	7,58
	5	2,90	7,30			7,87	6,26	7,07
	6	2,47	7,30			6,73	5,44	6,08
	7	3,92	7,24			5,27	6,15	5,71

В основу изучения физических процессов, протекающих под смежными чеками и устанавливающих причинность изменения урожайности риса, был положен метод сопряженных наблюдений

за объективными проявлениями террасности, к которым относятся: а) разница в водных балансах высокого и низкого чеков; б) интенсивность и направление фильтрации в симметричных точках рисовых чеков; в) режим грунтовых вод; г) биометрия и урожайность риса. Полевые опыты проводились с 1972 по 1975 гг. на Кубанской оросительной системе в двух рисосеющих хозяйствах – «Красное» и «Россия».

Перепад между опытными чеками составлял 0,46–0,50 м, т. е., взяты почти предельные случаи. При этом в обоих случаях нижние чеки были гипсометрически «зажатыми»: прилегающие к ним справа и слева чеки имели более высокие отметки.

Приходно-расходные статьи водного баланса определяли по методике [10] с установкой водосливов с тонкими стенками, сосудов-испарителей и водомерных реек на чеках и в каналах. Кроме того, для фиксации горизонтов воды устанавливали самописцы уровней «Валдай».

Режим грунтовых вод изучали с помощью батарей разноглубинных скважин-пьезометров, заложенных на глубину 0,30; 0,60; 0,90; 1,20 и 1,50 м от средней отметки чека и расположенных на оси разделительного валика, а также в 2, 10 и 25 м от него в ту и другую стороны. Рядом со скважинами устанавливали стационарные фильтромеры для периодических замеров скорости фильтрации в выбранных точках.

Температурный режим почвы изучали в трех точках опытных чеков, расположенных в 5 и 15 м от разделительного валика, а также в центре чеков. Для замера температуры использовали глубин-

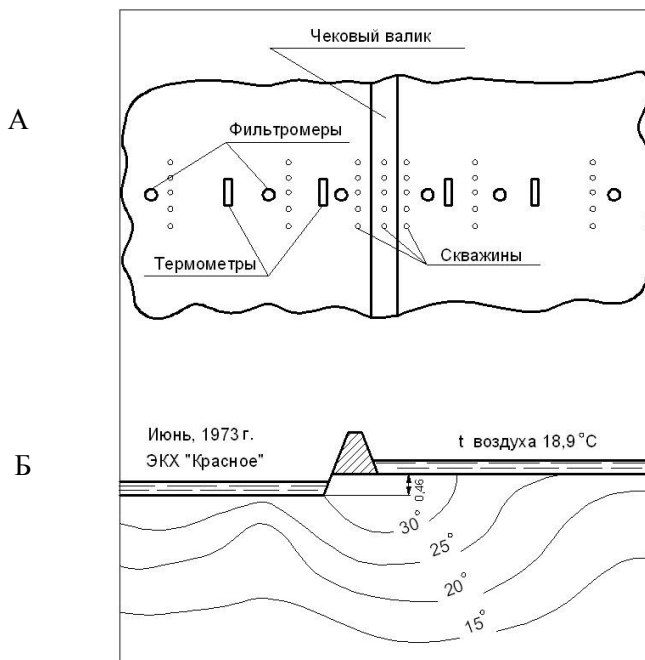
ные термометры, оборудованные электродатчиками с термосопротивлениями ММТ-4, заглубленными на 0,10; 0,60 и 1,10 м под поверхность чеков. Измеряли также температуру воды в слое затопления.

Наблюдения проводили ежедневно три раза в сутки – в 7, 13 и 19 ч. Характеристика опытных чеков представлена в таблице 5.8, а расположение гидрометрических и других постов – на рисунке 5.6. Зона аэрации под опытными чеками в хозяйстве «Красное» представлена двухслойной толщей грунтов: в верхней части мощностью 0,8 м залегают плотные гумусированные суглинки с коэффициентом фильтрации от 0,83 в начальных периодах орошения до 0,11 м/сут в конце; ниже (с глубины 1,2 м) залегают глинистые пески ($K = 3,2$ м/сут).

Таблица 5.8 – Характеристика опытных чеков

Хозяйство	Площадь смежных чеков, га		Отметка плоскости чеков, м		Глубина залегания УГВ перед посевом, м		Ср. коэф. фильтрации, м/сут
	высокий	низкий	высокий	низкий	высокий	низкий	
«Красное»	3,85	0,93	7,80	7,34	1,25	0,85	0,86
«Россия»	4,82	2,36	11,05	10,54	1,53	1,12	0,34

Водоупорный слой представлен голубоватыми глинами, залегающими на глубине 3,0–3,2 м. В колхозе «Россия» грунты близки к однородным с коэффициентом фильтрации от 0,5 до 0,1 м/сут. Как видно из описания, грунты и гидрогеология опытного участка типичны для рисовых систем Северного Кавказа, низовий Волги и Приморского края. Показатели водного баланса представлены в таблице 5.9.



А - план расположения термометров и скважин; Б - изотермы в зоне взаимодействия смежных чеков [11]

Рисунок 5.6 – Влияние террасности чеков на тепловой режим почв

Таблица 5.9 – Водный баланс смежных чеков (м³/га) в ЭСХ «Красное», 1973 г.

Показатель	Чек	
	высокий	низкий
Приход		
Подача оросительной воды	36630	2855
Атмосферные осадки	3984	3984
Подпитывание грунтовыми водами	-	14293
Итого:	40614	21132
Расход		
Насыщение почвы	1985	735
Эвапотранспирация	7360	5790
Фильтрация боковая	31147	102
Организационный сброс	122	16091
Итого:	40614	22718

Обращает на себя внимание качественное и количественное различие приходно-расходных статей. Подача воды отличается более чем в 12 раз. На низком чеке имел место постоянный вынужденный сброс из-за его перетопления, хотя водовыпуски из оросителя в чек после затопления поверхности не работали (были специально забиты грунтом). Величина вынужденного сброса в среднем составила 1,7 см/сут (1972 г. – 1,45; 1973 г. – 1,30; 1974 г. – 2,1 см/сут). На высоком чеке водовыпуск из оросителя в чек был постоянно открыт, а из чека в сброс, наоборот, забит грунтом. Фильтрация в смежный низкий чек и картовые дренажно-сбросные каналы составила в среднем 2,81 см/сут.

Наблюдения показали, что на верхнем чеке наблюдалась нисходящая фильтрация, на нижнем – выклинивание грунтовых вод. Интенсивность нисходящей и восходящей фильтрации ослабевала в обе стороны от разделительного валика (таблица 5.10).

Таблица 5.10 – Скорость (см/сут) нисходящей (-) и восходящей (+) фильтрации на смежных чеках в зависимости от удаления от разделительного валика («Красное», 1972 г.)

Чек	Расстояние от разделительного валика, м						В среднем
	1,5	6,5	11,5	16,6	21,5	27,0	
Верхний	-9,4	-10,6	-5,4	-3,3	-0,7	-0,3	-5,0
Нижний	+12,2	+5,5	+3,2	+1,9	+0,9	0,0	+3,9

Замеры уровней воды в скважинах показали, что на высоком чеке они находились постоянно на 0,1–0,2 м ниже горизонта воды в чеке, на низком, наоборот, на 0,01–0,03 м выше, что согласуется как с данными, полученными на фильтромерах, так и с гидродина-

мической схемой движения грунтовых вод под затопленными террасами.

Температурный режим почвы в зоне активной фильтрации (в полосе взаимодействия смежных чеков) различался существенно. Сумма температур почвы в центре корнеобитаемой зоны (0,10 м) на верхнем чеке оказалась значительно выше, причем прослеживается та же закономерность: по мере удаления от валиков разница уменьшается (таблица 5.11).

Таблица 5.11 – Температурный режим почвы под затопленным высоким (числитель) и низким (знаменатель) чеком в симметричных точках поверхности (ЭСХ «Красное», 1973 г.)

Расстояние от разделитель- ного валика, м	Среднесуточная температура почвы на глубине 0,10 м, град. С				Сумма температур, град. С
	Май (III декада)	Июнь	Июль	Август (I декада)	
5	<u>30,2</u> 18,6	<u>31,8</u> 21,7	<u>33,1</u> 23,8	<u>29,0</u> 22,0	<u>2572</u> 1822
15	<u>27,6</u> 22,3	<u>29,1</u> 23,7	<u>30,2</u> 29,2	<u>26,1</u> 25,8	<u>2343</u> 2129
Посередине чеков	<u>22,3</u> 25,4	<u>24,6</u> 28,2	<u>31,7</u> 34,3	<u>28,8</u> 35,4	<u>2232</u> 2546

Построенные по данным натурных замеров изотермы наглядно указывают как на различие в режимах, так и на конвективную (фильтрационную) причинность этого явления (см. рисунок 5.5). Идентичное различие и в солевом режиме грунтовых вод (таблица 5.12).

В частности, на опытных чеках в колхозе «Россия» и совхозе «Черноерковский» после затопления посевов под верхними чеками быстро образовалась прослойка пресных оросительно-

фильтрационных вод, под нижними, наоборот – сильноминерализованных грунтовых вод. На глубине 1,5 м их минерализация не изменилась.

Таблица 5.12 – Минерализация грунтовых вод (г/л) в поровом пространстве почвы под чеками (Краснодарский край, 1973-1976 гг.)

Место и время проведения опыта	Высотное положение чеков	Глубина отбора проб воды, м			
		0,30	0,90	1,20	1,50
Совхоз «Черноерковский» (1976 г.)	Высокий	–	0,9	2,4	7,6
	Низкий	–	1,7	4,2	10,2
Колхоз «Россия» (1973 г.)	Высокий	0,9	1,8	1,4	13,6
	Низкий	13,9	12,1	13,0	14,7
Примечание – измерение проводили в 5 м от разделительного валика					

Суммарным следствием террасности является значительная пестрота урожайности риса, наблюдаемая по ширине смежных чеков, и сильное угнетение посевов на нижнем, особенно заметное на засоленных почвах (таблица 5.13).

Таблица 5.13 – Урожайность риса на высоком и низком чеках, т/га

Хозяйство	Высотное положение чеков	Расстояние от подошвы разделительного валика, м			
		5	10	20	50
«Красное» (почвы незасоленные)	Высокий	4,44	5,43	5,22	5,18
	Низкий	2,74	2,58	3,39	3,72
«Россия» (почвы засоленные)	Высокий	4,72	5,31	5,26	5,20
	Низкий	1,54	1,23	2,45	2,68

В последующие годы получены многочисленные подтверждения нашего вывода о существенном влиянии террасности на мелиоративное состояние почв (таблица 5.14).

Таблица 5.14 – Урожайность риса на высоком и низком (зажатом) чеке

Хозяйство	Высотное положение чеков	Урожайность, т/га, по годам			
		1972	1973	1974	Средняя
«Красное»	Высокий	6,30	6,65	6,76	6,57
	Низкий	5,72	6,04	6,05	5,94
«Россия»	Высокий	–	6,84	7,13	6,98
	Низкий	–	4,55	4,89	4,72

Недобор урожайности по причине отрицательной террасности в среднем составляет: на незасоленных почвах – 0,63, на засоленных – 2,3 т/га.

6 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ РИСА

6.1 Конструкция поливной карты ВНИИ риса

Рисовая поливная карта Кубанского типа (ККТ-К) считается в настоящее время эталоном не только в нашей стране, но и за рубежом. Однако и она имеет недостатки, ухудшающие мелиоративное состояние почв и повышающие стоимость строительства рисовых систем. К таким недостаткам относятся:

1. Устройство на ККТ-К тупиковых укороченных картовых оросителей в насыпи вместо сквозных заглубленных (в полувыемке-полунасыпи) снижает дренированность поливной карты в межполивной период и увеличивает объем земляных работ по устройству подушки, почвогрунт для которой изымается с прилегающих чеков. В этом случае осушение чеков для уборки урожая проходит крайне медленно, из-за увеличившегося в 2 раза междренного расстояния: комбайнам приходится работать в переувлажненных грунтах, в связи с чем снижается их производительность, а потери урожая увеличиваются на 15–20 % и более [34].

2. Укорочение длины поливной карты с 800–1000 м до 600 м приводит к увеличению протяженности глубоких коллекторных каналов, что также увеличивает стоимость строительства рисовых систем.

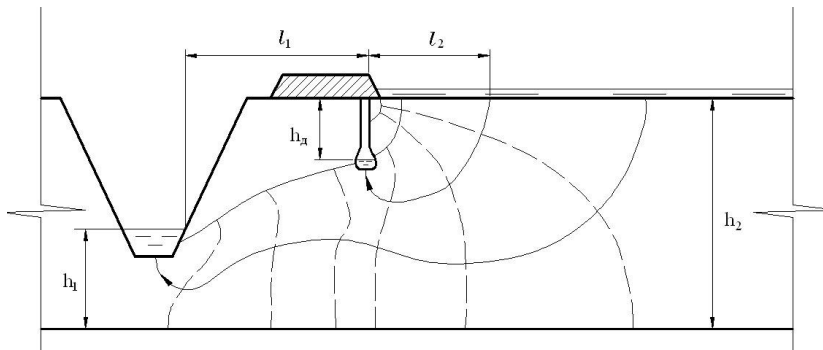
3. Устройство посередине карты широкой полевой дороги осуществляется за счет почвогрунта, изымаемого с прилегающих чеков, что обуславливает снижение их плодородия.

4. Каналы водоотводящей сети устраивают трапецеидального типа. Откосы таких каналов в межполивной период, как правило, оплывают, а дно заиляется (рисунк 6.1), в связи с чем осушительная способность снижается.

А



Б



А – разрушение канала вследствие оползней;

Б – гидродинамическая сетка для сочетания открытой и закрытой дрен

Рисунок 6.1 – Гидрогеодинамика в зоне действия глубоких дренажных каналов

Конструкция и параметры поливной карты, где перечисленные недостатки устраняются, представлены на рисунке 6.2.

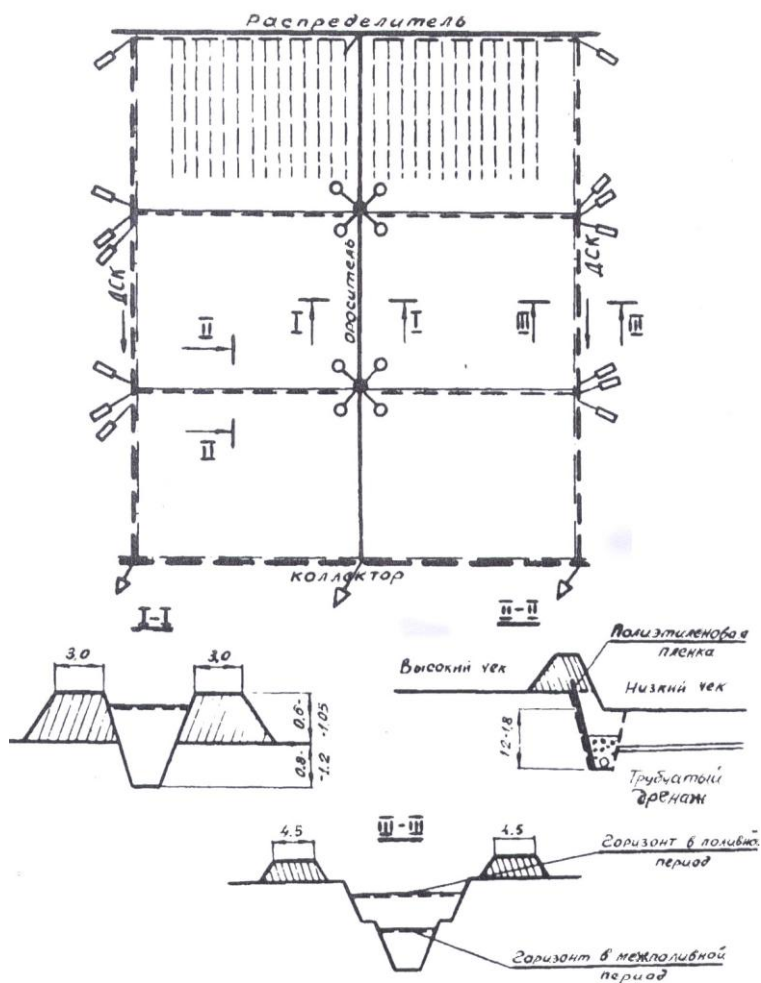


Рисунок 6.2 – Рисовая поливная карта с равновеликими чеками

Исключение вышеперечисленных недостатков поливной карты Кубанского типа достигается за счет применения в карте с равновеликими чеками следующих технических решений:

1. Картовый ороситель устроен в полувыемке-полунасыпи и проходит по всей длине карты – от участкового распределителя до участкового коллектора, причем он заканчивается водовыпускным сооружением из оросителя в коллектор. Эти меры, во-первых, исключают необходимость в устройстве дамб оросителя из почвогрунта, изымаемого с площади рисовых чеков, а во-вторых, в межполивной период канал выполняет осушительную функцию, что ускоряет предуборочное осушение.

2. Количество рисовых чеков увеличивается с 4 до 6, что снижает число глубоких коллекторов и повышает коэффициент земельного использования рисовых систем.

3. Для исключения негативного влияния неизбежной террасности чеков и уравнивания мелиоративных условий нижних чеков с прилегающими верхними между ними устраивают под валиком противofильтрационные экраны на глубину 1,2–1,8 м из водонепроницаемой полиэтиленовой пленки, а по площади нижнего чека прокладывают кротовый дренаж. Это мероприятие исключает подземный переток воды с верхнего в нижний чек и ускоряет понижение уровня грунтовых вод в период получения всходов риса и предуборочный период. Урожайность на нижнем чеке повышается в 1,8 раза [56], а потери урожая на уборке снижаются на 30–40 %.

4. Устройство осушительных каналов с внутренней бермой, устраиваемой на границе между уровнями воды в поливной и меж-

поливной периоды, снижает объемы экскаваторных работ и повышает устойчивость откосов к оплыванию.

6.2 Новый способ орошения сопутствующих культур рисовых севооборотов

Как известно, на рисовых оросительных системах применяют специализированные севообороты. ГОСТ 16265-89 «Земледелие. Термины и определения» дал такое определение специализированному севообороту: «Полевой севооборот с предельно допустимым насыщением посевами одной из полевых культур». Исходя из этого, рисовый севооборот – это полевой севооборот с предельно допустимым насыщением посевами риса. Установление величины предельно допустимого насыщения рисом является одной из важных задач агробиологической науки.

Для культуры затопляемого риса набор, насыщение и чередование культур определяются биолого-экономическим условием: устойчивое производство максимально возможных валовых сборов риса. Это условие обосновано следующими фактами: во-первых, рис дает более высокие урожаи, чем другие зерновые культуры (рожь, пшеница, ячмень и др.), во-вторых, цена риса на мировом рынке значительно выше стоимости других культур, а в третьих, эти другие культуры можно успешно возделывать на юге РФ, получая достаточно высокие урожаи на богаре и не прибегая к строительству дорогостоящих рисовых систем.

Многолетние исследования ВНИИ риса (1937–1987) показали, что экономическая и экологическая эффективность рисового севооборота достигается при условии включения в него многолетних трав (люцерна), значение которых в поддержании высокого плодородия почв велико и многогранно:

1) люцерна обогащает почву активным органическим веществом, которое невозможно заменить минеральными удобрениями. Общее количество растительных остатков, оставляемое люцерной после двухлетнего стояния, колеблется в пределах 120-160 т/га. В них содержится до 120-140 кг/га азота биогенного происхождения;

2) биомасса люцерны, богата протеином, в котором содержание углерода и азота примерно одинаково, является хорошим субстратом для активной деятельности микроорганизмов. При этом увеличивается численность и расширяется состав микробиоценоза, участвующего в превращении азота и других веществ. Усиливаются процессы аминификации, азотфиксации, трансформации железа, марганца, снижается токсическое действие сероводорода, повышается ферментативная активность;

3) в благоприятном направлении идут окислительно-восстановительные процессы, почва после люцерны обогащается кислородом, что необходимо для получения и сохранения высокой густоты стояния растений риса, содержание гумуса увеличивается на 0,3–0,5 %, улучшается структура почвы.

Как показали многолетние наблюдения, средний урожай риса за период 1938–1965 гг. составил: на восьмиполосном севооборотном участке с травами (два поля), занятым паром (одно поле) и пя-

тью полями риса – 23,0 т/га; на монокультуре (бессменный посев риса) – 19,8 т/га.

Роль люцерны как ведущего предшественника риса усиливается в случае, когда она сама дает высокие урожаи, что в условиях климата с недостаточным и неустойчивым увлажнением возможно только при орошении. Однако орошение на рисовых системах с горизонтально спланированными чеками и способом затопления невозможно, так как севооборотные культуры при затоплении погибают. Применение же дождевальных машин для их полива экономически невыгодно и трудоемко. Нами разработан способ орошения сопутствующих культур затоплением по чекам, не приводящий к их гибели и позволяющий получить высокие урожаи, в 1,5–2 раза выше, чем без полива.

Суть его рассмотрим на примере карты Кубанского типа с четырьмя чеками и типовым расходом в голове картового оросителя $Q = 410$ л/с. Сопутствующая культура – люцерна.

Поливную норму $W_{\text{пол}}$ определим из расчета создания на чеке слоя воды 5 см, при средней глубине промачивания почвы до полной влагоемкости 25 см. Она оказывается равной $1625 \text{ м}^3/\text{га}$.

На поливной карте устраиваем 4-тактный водооборот, т. е. весь расход из оросителя направляется в первый чек, после затопления которого переходим ко второму и последующим чекам. Поскольку расход водовыпуска из оросителя в чек существенно ниже расхода в оросителе, во втором углу чека устанавливаем пакет переносных трубчатых сифонов диаметром 100–200 мм с таким рас-

четом, чтобы общий расход поступающей в чек воды был равен расходу оросителя, т. е. $410 \text{ м}^3/\text{с}$.

Продолжительность полива T определим по формуле

$$T = \frac{W_{\text{пол}}}{Q \cdot 3600}, \text{ ч.} \quad (6.1)$$

Подставляя известные данные, получим: $T = 1,1 \text{ ч}$.

Продолжительность рецессии R , т. е. период времени, истекшего с момента начала подачи воды на чек до полного ее поглощения на затопленном чеке $W_{\text{сл}}$, определим по формуле

$$R = \frac{W_{\text{сл}}}{(I + T) + B}, \quad (6.2)$$

где $(I+T)$ – эвапотранспирация, мм

B – впитываемость почвы, мм/сут.

В нашем случае при $(I+T) = 20 \text{ мм/сут}$, $B = 25 \text{ мм/сут}$ получим: $T = 1,1 \text{ сут}$. Понижение уровня верховодки до глубины 25 см произойдет за одни сутки. Как видно из таблицы 6.1, параметры осушения соответствуют биологическим нормам осушения многолетних трав [53].

Таблица 6.1 – Допустимые сроки отвода воды с почвы в летне-осенний период (сут)

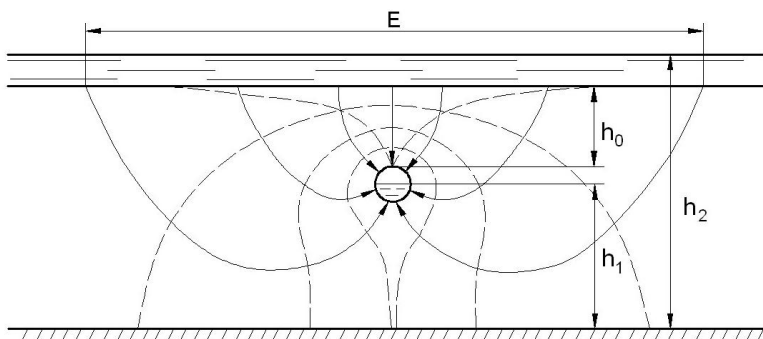
Культура	Отвод воды		
	с поверхности почвы	из слоя почвы 0-25 см	из слоя почвы 0-50 см
Зерновые	0,5	1,2	2-3
Овощи и корнеплоды	0,5	1,5	2-3
Многолетние травы	1,5	2-3	4-5

6.3 Внутрочечковый трубчатый и беструбчатый (кротовый) дренаж

Слабым звеном существующих систем орошения является сложность получения дружных всходов оптимальной густоты (250–300 раст./м²). Как правило, в производственных условиях густота всходов не превышает 120–150 раст./м² при норме высева 600–700 жизнеспособных семян на 1 м². Урожайность при этом снижается незначительно, так как рис отличается высокой кустистостью (до 4–6 боковых стеблей). Однако продолжительность вегетационного периода в этом случае увеличивается (на образование одного бокового побега затрачивается 2–3 дня) и в случае ранней дождливой осени возрастают потери урожая при его уборке, достигающие в отдельные годы 1,6–1,8 т/га.

Гибель значительного количества семян объясняется недостатком кислорода в слое их размещения (1–5 см). Укороченное затопление (т. е. получение всходов без слоя воды) обеспечивает атмосферным кислородом только ту часть семян, которая размещается в верхнем слое (1–2 см), остальные гибнут, так как влажность почвы ниже 2 см высокая – полная влагоемкость.

Чтобы обеспечить нижние слои кислородом, необходимо не только сбросить воду с поверхности чека, но и понизить уровень почвенно-грунтовых вод до глубины 0,4–0,5 м. Это может быть достигнуто с помощью трубчатого или кротового дренажа (рисунок 6.3). Его параметры: глубина прокладки 0,4–0,5 м, расстояние между кротодренажными линиями от 2–4 до 10 м [17].



E – расстояние между дренами; h_0 – глубина прокладки

Рисунок 6.3 – Кротовый дренаж с гидродинамической сеткой движения грунтовых вод под затопленным микропонижением

Мелиоративная и биологическая эффективность кротового дренажа: 1) обогащает верхний слой почвы атмосферным кислородом, благодаря чему густота всходов увеличивается до оптимальной; 2) ускоряет просушку почвы, способствуя повышению температуры на глубине 5 см на 1,3-1,5°; 3) ускоряет вынос солей, накопившихся в результате вторичного засоления в межполивной период; 4) повышает плодородие почв и улучшает их водно-физические свойства (пористость, водопроницаемость); 5) урожайность риса повышается в среднем на 1,1 т/га.

6.4 Прерывистое затопление посевов риса по типу асимметричных треугольных импульсов

В последние 15 лет в рисовом водохозяйственном комплексе Кубани (РВХКК) произошли негативные изменения: уровень воды

в Краснодарском водохранилище по техническим причинам был понижен на 0,9 м, Шапсугское водохранилище полностью вышло из строя, а проектная емкость других водохранилищ снижена на 10–15 %. В результате РВХКК потерял более 1 км³ речной воды, в связи с чем площадь посевов риса пришлось сократить на 30 тыс. га, а от орошения сопутствующих культур – отказаться совсем [38]. Валовые сборы риса снизились до 500–600 тыс. т. Однако и эти меры оказались недостаточными – в маловодные острозасушливые годы, которые встречаются в среднем 1 раз в 6 лет, посевы риса испытывают дефицит воды, что приводит к снижению валовых сборов на 40–60 тыс. т. В связи с изложенным разработка принципиально новых, водосберегающих режимов орошения, стала актуальной задачей для ученых ВНИИ риса. Одним из перспективных направлений является переход с традиционного постоянного на прерывистое затопление по типу треугольных асимметричных импульсов (рисунок 6.4), разработанных на уровне изобретения группой мелиораторов института.

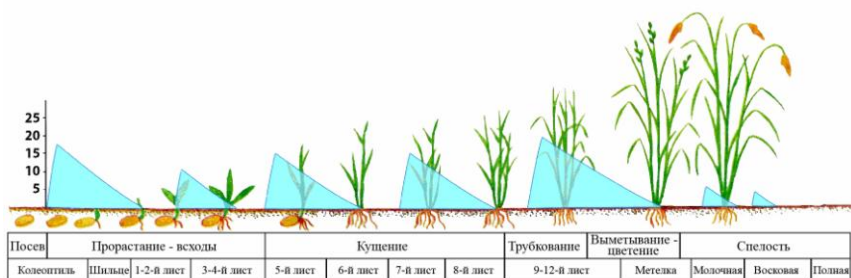


Рисунок 6.4 – Модель импульсного затопления рисовых чеков

От постоянного затопления новый режим орошения отличается тем, что после посева семян и затопления посевов риса слоем 12–15 см водовыпуск из оросителя в чек закрывают, а после сработки слоя за счет испарения, фильтрации и транспирации поверхность чека держат без слоя воды до тех пор, пока влажность почвы не снизится до критического значения, затем водовыпуск открывают и вновь создают слой воды заданной величины и так далее в той же последовательности. Специальные вегетационные и полевые исследования показали, что критическое значение влажности почвы 85% ПВ. Объясняется это тем, что при влажности почвы ниже 85% сосущая сила корней риса не может полностью преодолеть ее водоудерживающую способность, и поглощение влаги из капилляров снижается. Вместе с этим уменьшается и поступление в растение количества растворенных в воде минеральных удобрений, что вызывает снижение урожайности. Необходимо заметить, что диаметр капилляров сосудов ксилемы у риса существенно выше, чем у богарных культур, которые способны извлекать из почвы влагу при влажности менее 85 % ПВ при оптимальной влажности 75–80 % наименьшей влагоемкости (НВ).

Результаты вегетационных и полевых опытов позволили сделать следующие выводы:

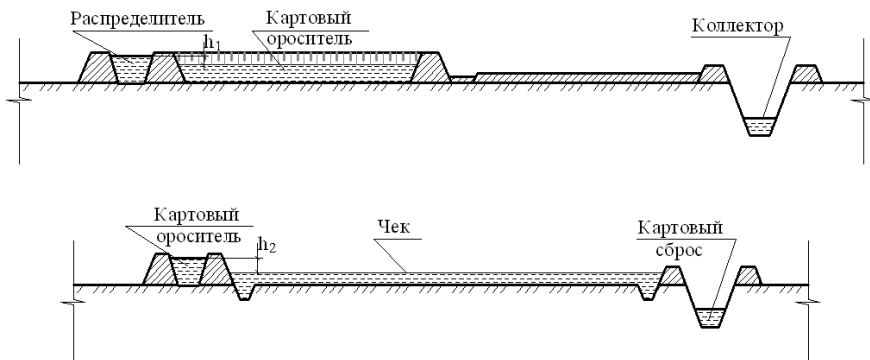
1. Прерывистое (импульсное) затопление чеков в полной мере соответствует экологии риса, так как на его родине, где источником орошения в сезон дождей являются частые обильные ливни (80–100 мм), наблюдается именно импульсное неуправляемое затопление.

2. Импульсное затопление не снижает урожайности, при этом, обогащая обнаженную почву кислородом, оно предотвращает болезни корней и полегаемость посевов риса. По этой причине при уборке комбайнами урожайность риса при одинаковой биологической оказалась за счет снижения потерь на 4 ц/га выше.

3. Экономия воды при внедрении двухтактного водооборота на участке севооборота в среднем составила 8 тыс. м³/га.

6.5 Гидравлическая автоматизация орошения риса

Неотъемлемым компонентом прогрессивной рисовой оросительной системы является автоматизация орошения, основной задачей которой является соблюдение заданного режима орошения. Среди смежных задач особое значение имеют экономия водных ресурсов, использование гидравлической энергии воды и снижение трудозатрат эксплуатационного персонала. Затворы-автоматы, работающие за счет использования гидравлической энергии, называются гидравлическими. На наш взгляд, на рисовой оросительной системе гидравлическая автоматизация наиболее эффективна на уровне поливной карты. Это означает, что все сооружения оросительной сети поливной карты должны быть автоматизированы. В частности, в карте краснодарского типа следует автоматизировать чековые водовыпуски и головные сооружения (рисунок 6.5).



h_1 – перепад рабочих отметок между уровнем воды в распределителе и картовом оросителе; h_2 – перепад рабочих отметок между уровнем воды в оросителе и прилегающем чеке

Рисунок 6.5 – Гидроэнергетические ресурсы рисовой поливной карты

В силу особенностей конструкции карты «Кубанская» в ней помимо картовых оросителей следует также автоматизировать регулирующие сооружения на распределителях (поля севооборота).

Принципиальная и техническая возможность автоматизации была заложена еще при проектировании и строительстве рисовых систем. В частности, п. 7.4 технических требований ВСН-П-25-75 [61] предусматривал обеспечение возможности автоматизации водораспределения в перспективе без коренной реконструкции системы путем проектирования системы таким образом, чтобы на сетевых сооружениях обеспечивалось наличие перепадов уровня от 15 до 25 см. Такие перепады, как правило, обеспечены на построенных РОС и они достаточны для управления водным режимом с помощью гидравлических регуляторов.

К сожалению, проектные материалы на существующие РОС в большинстве случаев утеряны. Даже при их наличии фактическое плановое и высотное положение чеков и сооружений отличается от проектных вследствие выполнения земляных работ по планировке чеков, расчистке каналов, их углублению и ремонту. Поэтому внедрение автоматизации на каждом конкретном участке РОС помимо расчетов системы регулирования требует выполнения предварительных изыскательских работ, завершающим документом которых является «Проект автоматизации участка РОС». Он предназначен для внутреннего пользования специалистами службы эксплуатации рисосеющих хозяйств и должен иметь основные разделы:

- исполнительная геодезическая съемка каналов и чеков автоматизируемого участка ;
- расчет уровненного режима чеков, оросительных и распределительных каналов;
- выбор технических средств регулирования водораспределения и рекомендации по установке и эксплуатации.

Рассмотрим подробнее содержание каждого из рекомендуемых разделов проекта.

Система автоматизированного регулирования должна иметь точную и надежную геодезическую основу, так как автоматическое поддержание расчетного уровня должно выполняться с точностью $\pm 0,5$ см. Поэтому при разработке проекта автоматизации рекомендуется выполнить топогеодезические изыскания:

- рекогносцировочное обследование участка автоматизации с использованием средств GPS;

- прокладка тахеометрического хода от существующих на системе пунктов государственной геодезической сети; закрепление точек съемочного обоснования;

- тахеометрическая съемка поверхности чеков, валиков, каналов оросительной и распределительной сети поля севооборота;

- обработка данных изысканий с получением топоплана поля севооборота, средних отметок чеков и профилей линейных сооружений;

- закладка сети опорных реперов.

Таким образом, в результате геодезического обоснования системы автоматизированного регулирования получают исходные данные для выполнения проекта автоматизации и закладывается основа дальнейшей надежной многолетней эксплуатации и мониторинга объекта регулирования.

Структурной единицей оросительной системы, на которой целесообразно применить комплекс низконапорных средств гидравлической автоматизации, является поле севооборота. Рассмотрим модуль РОС «Кубанская» и элементы оросительной сети, требующие автоматизированного регулирования уровня режима: рисовые чеки, картовые оросители и распределительные каналы. Возможность автоматизации водораспределения на этом уровне внутрихозяйственной сети, как правило, обеспечивалась еще на стадии проекта рисовой системы. Согласно п. 7.4 ВСН-П-25-75 [61], при проектировании оросительных каналов предусматривались перепады горизонтов на внутрихозяйственной оросительной сети: на водовыпусках с расходом до $1 \text{ м}^3/\text{с}$ – 15–20 см, на перего-

раживающих сооружениях с тем же расходом – 15 см, на всех регулируемых сооружениях с расходом более $1 \text{ м}^3/\text{с}$ – 20–25 см. Исходя из этого, рекомендуемые ВСН [61] значения перепадов целесообразно принять за основу при разработке современных проектов автоматизации.

Последовательное суммирование глубины в чеке, перепада «чек – ороситель» и перепада «ороситель – распределитель» в привязке к отметке поверхности чека (с учетом потерь на водовыпусках) дает минимальное значение отметки уровня в верхнем бьефе водовыпуска из распределителя в ороситель. Окончательный уровень режим распределителя устанавливается после анализа требуемых минимальных отметок на всех водовыпусках в оросители, ориентируясь на максимальную из них до и после подпорных сооружений в средней части модуля.

При проектировании уровня режима в звене «чек – картовый ороситель» также целесообразно учитывать рекомендации ВСН [61], согласно которым младшие каналы оросительной сети – картовые оросители – должны обеспечивать затопление самого высокого чека:

- в период первоначального затопления (и максимального расхода оросителей) – слоем 10–15 см;
- в период поддержания слоя затопления (и минимального расхода оросителей) – слоем до 25 см.

Расчетная величина потерь напора в водовыпусках из картового оросителя в чек составляет 5–15 см.

Если затопление отдельных чеков требует увеличения горизонта воды в старшем канале, то максимальную глубину затопления таких чеков допускается ограничивать до 15 см.

В пределах поля севооборота на водовыпусках из оросителей в чеки предусматривается установка регуляторов уровня нижнего бьефа для обеспечения требуемой глубины затопления чеков в вегетационный период. Распределитель модуля следует оборудовать канальным регулятором уровня в голове канала и в нижнем бьефе подпорного сооружения, расположенного, как правило, в середине модуля. Канальные регуляторы уровня позволяют соблюдать расчетный уровенный режим распределителя и исключают переполнение канала. Практика показывает, что для модуля РОС «Кубанская» приходится дополнительно применять канальные регуляторы нижнего бьефа и в голове некоторых оросителей. Это связано с тем, что отметки построенных валов оросителей недостаточны по высоте и при соблюдении расчетного уровенного режима распределителя происходит перелив воды в чеки через гребень вала.

Окончательно для объекта автоматизации устанавливаются: расчетные отметки уровня воды для каждого чека; расчетные отметки уровня в оросительных и распределительных каналах; местоположение основных и дополнительных канальных регуляторов уровня. Для специалистов службы эксплуатации подготавливается информация о взаимном расположении пунктов контроля уровня и сети закрепленных реперных геодезических точек.

По вопросу выбора технических средств регулирования водораспределения невозможно дать однозначные рекомендации. На

сегодняшний день разработано значительное количество технических средств, предназначенных для гидравлической автоматизации рисовых систем. Выбор конструкции технического средства регулирования помимо таких важных факторов, как точность регулирования и надежность, может также определяться региональной распространенностью той или иной конструкции, территориальной близостью разработчика и производителя, стоимостью конструкции, наличием службы сервиса и другими факторами. Окончательное решение по выбору принимаемой конструкции должно приниматься на основе детального рассмотрения всех вышеперечисленных факторов.

В рамках договора о сотрудничестве между КубГАУ и ВНИИ риса последний проводит производственные испытания гидравлических регуляторов уровня. В большинстве случаев используются разработки факультета водохозяйственного строительства и мелиорации Кубанского государственного аграрного университета, для которого разработка и совершенствование специализированных средств водораспределения для РОС является одним из основных научных направлений в области мелиорации. Здесь ежегодно проводятся разработки новых и совершенствование существующих конструкций гидроавтоматов. В частности, с 2010 по 2012 г. проведены следующие производственные испытания ряда модифицированных конструкций регуляторов уровня воды гидравлического действия:

– модифицированный чековый регулятор уровня АЧВ-300 для поддержания слоя воды;

– модифицированный чековый регулятор уровня АЧВ-300 для дискретной подачи воды в чеки;

– модифицированный канальный регулятор уровня АТР-600.

Основой конструктивного исполнения модифицированных конструкций являются разработанные ранее «Регулятор уровня в бьефах гидротехнических сооружений» [63] и «Автоматизированный чековый водовыпуск» [64]. На основе вышеуказанных авторских решений разработан автоматизированный чековый водовыпуск АЧВ-300, позволяющий в зависимости от принятого режима орошения осуществлять поддержание заданного слоя воды или дискретную подачу воды на рисовый чек с заданной величиной сработки уровня. В зависимости от режима работы водовыпуск комплектуется соответствующим видом модифицированного регулятора уровня – регулятором уровня (слоя) воды или дискретным регулятором (регулятором величины сработки уровня). Оба регулятора имеют однотипную унифицированную основу, включающую металлический корпус затвором поворотного типа и системой питающих патрубков и силовых элементов. Поэтому оба регулятора обладают одинаковыми гидравлическими характеристиками. Пропускная способность водовыпусков различных модификаций практически одинакова и приближено ($\pm 15\%$) определяется по графику расходной характеристики (рисунок 6.6). Более точное значение пропускной способности водовыпуска определяется по зависимости (6.3).

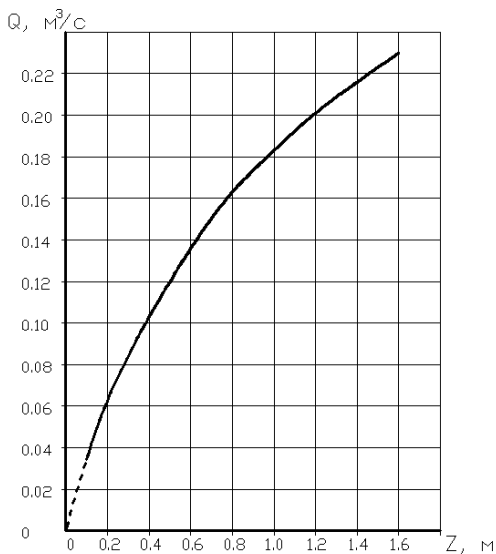


Рисунок 6.6 – График зависимости $Q = f(Z)$

$$Q = \mu_c \omega \sqrt{2gZ_0} , \quad (6.3)$$

где Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$;
 ω – площадь поперечного сечения водовыпускного трубопровода, м^2 ;
 Z_0 – гидравлический перепад с учетом скорости подхода, м ;
 μ_c – коэффициент расхода системы:

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\Sigma \zeta + \zeta_B}} , \quad (6.4)$$

где $\Sigma \zeta$ – суммарный коэффициент сопротивления водовыпускного трубопровода;
 ζ_B – коэффициент сопротивления на выходе (регулятора).

Значение коэффициента выходного сопротивления определяются углом открытия поворотного клапана, а величина этого угла зависит от величины гидравлического перепада, т. е. $\zeta_{\text{в}} = f(Z_0)$.

При расчете пропускной способности сооружений с перепадом уровней воды в чеке и оросителе более 0,7 м коэффициент сопротивления на выходе не изменяется и принимается $\zeta_{\text{в}}=1$. При меньших перепадах значение $\zeta_{\text{в}}$ определяется по графику (рисунок 6.7).

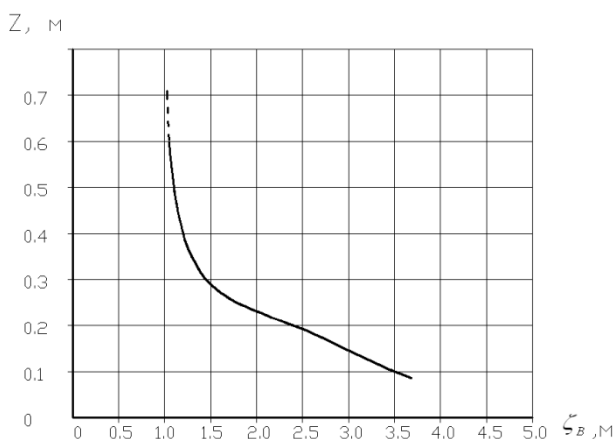
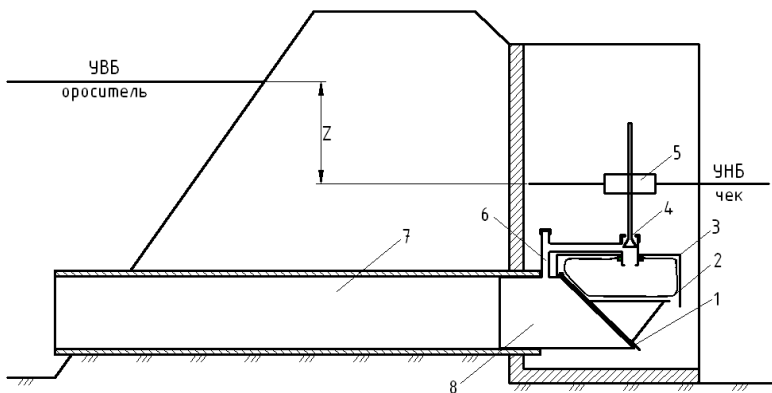


Рисунок 6.7 – График зависимости $\zeta_{\text{в}} = f(Z_0)$

АЧВ-300 для поддержания уровня (слоя) воды представляет собой сооружение с гидравлическим регулятором уровня воды поворотного-клапанного типа непрямого действия. Регулятор уровня устанавливается на сооружениях с гидравлическими перепадами 0,1–1,5 м и расходами 0,045–0,22 м³/с в нижнем бьефе сооружения непосредственно на водовыпускной трубе (рисунок 6.8). Точность поддержания уровня воды в чеке составляет ± 5 мм.



1 – затвор; 2 – эластичная емкость; 3 – крышка-камера; 4 – выходное отверстие; 5 – поплавок; 6 – питательная трубка; 7 – труба водовыпуска; 8 – моноблочный металлический корпус

Рисунок 6.8 – Автоматизированный чековый водовыпуск с регулятором слоя воды в рисовом чеке

В случае образования отрицательного перепада водовыпуск автоматически закрывается и предупреждает обратный ток воды.

Регулятор состоит из моноблочного металлического корпуса 8, который закрепляется в трубе 7 с помощью распорного хомута. Регулирование подачи воды через водовыпуск осуществляется закрепленным на горизонтальной оси вращения затвором 1, над которым под крышкой 3 установлена эластичная емкость 2, сообщающаяся соединительной трубкой с питательной трубкой 6 и нижним бьефом. Отверстие 4 в соединительной трубке, отводящее воду в чек, перекрывается конусом, соединенным резьбой со штоком, на котором крепится поплавок 5.

При недостаточном уровне воды в чеке под действием гидравлического перепада затвор 1 отжимается и происходит наполнение

нижнего бьефа, при этом выходное отверстие 4 соединительной трубки открыто и вода из эластичной емкости 2 выдавливается в нижний бьеф.

При достижении заданного уровня поплавков 5 поднимается, и конус перекрывает выходное отверстие 4. Емкость 2 по соединительной трубке наполняется водой и прижимает затвор 1 к наклонному срезу корпуса 8. Доступ воды в чек прекращается.

С целью повышения пропускной способности регулятора при малых углах открытия срез корпуса регулятора 8 в выходном сечении выполнен под углом 45° .

Высокая точность установки датчика уровня достигается ступенчатым (через 10-15 мм) закреплением поплавка 5 на штоке.

Технические преимущества:

- компактность;
- минимальные гидравлические потери, поскольку водопропускная труба не загромождается никакими препятствиями;
- отсутствие обратного тока воды из чека в ороситель;
- высокая степень защиты эластичной рабочей емкости от динамических воздействий потока;
- возможность снижения металлоемкости регулятора путем изготовления большинства комплектующих узлов из пластмассы.

АЧВ-300 для дискретного регулирования (регулирования величины сработки уровня) воды представляет собой сооружение с дискретным регулятором уровня воды поворотного-клапанного типа непрямого действия. По конструкции дискретный регулятор аналогичен регулятору уровня воды, но для обеспечения контроля за ве-

личиной сработки в нем применен модифицированный датчик уровня, выполненный в виде телескопической системы.

Исполнение датчика в виде телескопической системы (рисунок 6.9) позволяет устанавливать диапазон сработки уровня воды в чеке.

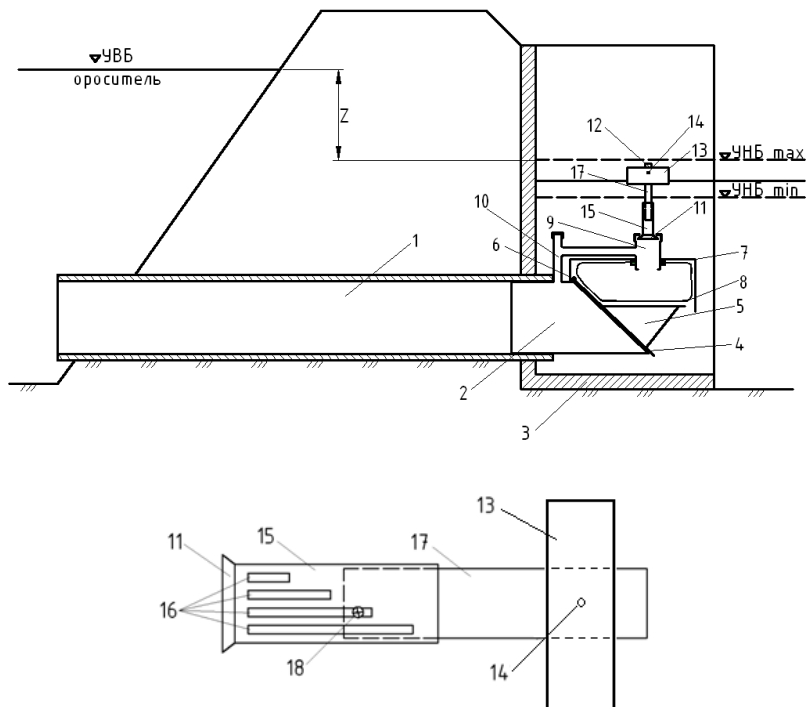


Рисунок 6.9 – Автоматизированный чековый водовыпуск с дискретным регулятором

Автоматизированный чековый водовыпуск для дискретного регулирования состоит из водоподводящей трубы 1 с регулятором

2. Наличие чекового бетонного оголовка 3 не является обязательным. Корпус регулятора 2 содержит затвор 4, состоящий из трех площадок 5, жестко и под углом соединенных друг с другом. Затвор 4 установлен на горизонтальной оси вращения 6. Регулятор оснащен крышкой 7. Над затвором 4 размещена управляющая камера 8 из эластичной оболочки. Управляющая камера 8 защищена со стороны нижнего бьефа крышкой 7 и сообщается с нижним бьефом через отверстие 9, а с верхним - питающей трубкой 10. Отверстие 9 в соединительной трубке, отводящее воду в чек, перекрывается клапаном 11, соединенным резьбой с телескопической системой 12 и датчиком уровня 13 (поплавок), который крепится к системе 12 фиксатором 14. Телескопическая система состоит из внешней части 15 с продольными прорезями 16, и внутренней части 17 с ограничителем 18.

При сработке уровня воды в нижнем бьефе датчик уровня 13 опускается и своим весом открывает (при УНБ min) клапан 11. Вода, поступающая в камеру 8 по питающей трубке 10, вытекает через отверстие 9. Поэтому в управляющей камере 8 не возникает избыточного давления. В то же время давление воды в подводящей трубе 1, возникающее за счет гидравлического перепада Z на сооружении, открывает затвор 4, свободно поворачивающийся на оси вращения 6. Вода поступает в нижний бьеф и наполняет его.

Повышение уровня воды в чеке приводит к подъему датчика 13, который при достижении УНБ max поднимает клапан 11, который в свою очередь перекрывает отверстие 9. Вода из верхнего бьефа через питающую трубку 10 наполняет камеру 8, которая по-

ворачивает и закрывает затвор 4. Поток воды в чек прекращается и начинается цикл сработки уровня до УНБ min.

Обе конструкции чековых регуляторов уровня успешно прошли производственные испытания на экспериментальном участке рисовой оросительной системы ВНИИ риса в течение вегетационного периода 2011 г. Особый научный интерес представляло изучение работы дискретного регулятора уровня. На рисунке 6.10 показан экспериментальный чек в момент контролируемой регулятором АЧВ-300 сработки уровня. На момент фиксации уровень в чеке сработан до поверхности почвы.



Рисунок 6.10 – Дискретный регулятор в режиме сработки уровня на экспериментальном участке РОС ГНУ ВНИИриса

В ходе эксперимента на чеке был успешно реализован режим прерывистого орошения по типу треугольных асимметричных импульсов под контролем гидравлического регулятора уровня. На рисунке 6.11 показана динамика хода уровня воды в экспериментальном чеке. На графике отчетливо отмечаются два основных технологических импульса с резким наполнением чека в начале третьей декады июня и в конце первой декады августа. После наполнения идет период сработки. Неравномерность хода уровня в период сработки (подъемы и падения при общей тенденции снижения) вызвана выпадением осадков, которые аккумулировались в чеке. Нехарактерные подъемы уровня в начале и в середине третьей декады августа произошли за счет внешнего непрогнозируемого человеческого вмешательства (регулятор был механически выведен из режима рыбаками-вожерами). Однако после наполнения чека регулятор снова входил в режим сработки уровня.

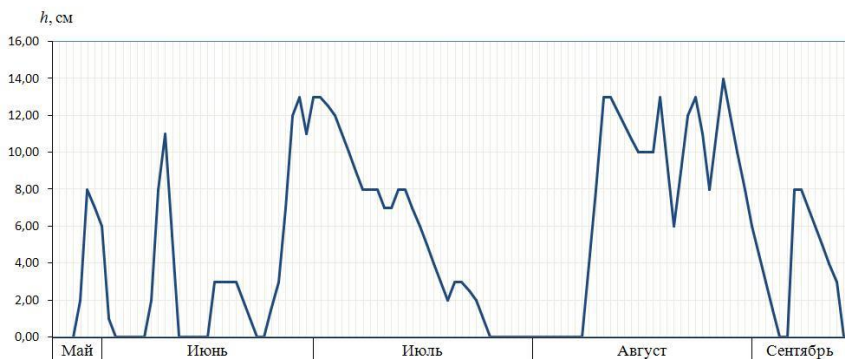


Рисунок 6.11 – Динамика хода уровня воды в экспериментальном чеке с дискретным регулированием

Оросительная норма при режиме прерывистого орошения оказалась меньше, чем на контрольном чеке при традиционном укороченном затоплении, на 4143 м³/га, или на 25,9 %. Урожайность риса при уборке комбайнированием на чеке с прерывистым орошением составила 77,8 ц/га, на чеке с регулируемым постоянным затоплением – 85,2 ц/га, при средней урожайности всех производственных посевов ВНИИ риса – 62,1 ц/га.

Таким образом, гидравлическая автоматизация сегодня эффективно реализуется как при традиционном, так и при инновационных ресурсосберегающих режимах орошения риса. Накоплен значительный опыт в области организации и эксплуатации автоматизированных участков рисовых систем. Разработан широкий ряд инновационных технических средств автоматизации, отвечающих жестким эксплуатационным условиям, характерным для оросительной сети при поливе риса. Все это является гарантированной основой получения высоких урожаев риса наряду с экономией основного производственного ресурса – оросительной воды.

6.6 Экологические и агромелиоративные требования, обеспечивающие техническое совершенство системы орошения риса

В последние десятилетия на юге Европейской части РФ наблюдается нарастающий дефицит водных ресурсов в бассейнах рек Дона, Кубани и Терека. Некоторые экологи усматривают в этом

нарушение экологического (водно-балансового) равновесия бассейнов по причине высоких объемов безвозвратного водопотребления. В качестве выхода из создавшегося положения предлагается сократить посевы риса и приостановить дальнейшее развитие орошения в целом.

Безусловно, водный фактор является лимитирующим в развитии экосистемы того или иного бассейна, но для крайних мер нет оснований: доктрина сохранения естественного состояния окружающей среды в условиях реально существующего социально-экономического и демографического положения, вынуждающего использовать природные ресурсы, представляется утопической. В условиях антропогенных воздействий на вооружение должна быть взята концепция экологически сбалансированного развития экономики (равновесное природопользование), позволяющая достичь компромисса между социально-экономическими целями общества и устойчивостью экосистем при осуществлении перевода эколого-экономической системы на новый качественный уровень. Эта концепция должна быть взята за основу, в частности, при подготовке проектов реконструкции рисовых систем. Такие проекты позволят уменьшить безвозвратные заборы воды на орошение, а возможность оперативного регулирования режима поверхностных и грунтовых вод сведет к минимуму применение пестицидов и других химических веществ. Максимальный эколого-экономический эффект может быть достигнут, если система орошения риса обеспечит соблюдение следующих условий:

- доля риса в специализированном севообороте должна быть не менее 62,5 %;

- урожайность риса в зерне должна быть не менее 5–6 т на 1 га севооборотной площади. Более низкая урожайность нерентабельна, более высокая возможна при реконструкции РОС на качественно новой инженерной основе;

- гидромодуль затопления должен быть для севооборотного поля не менее 10, для поливной карты – 20, рисового чека – 40 л/с га;

- оросительная норма риса должна находиться в пределах 16–20 тыс.м³/га, а коэффициент возврата в водоприемники использованных вод – не менее 0,75;

- срок созревания риса следует планировать не позднее 5 сентября, это позволит вовремя отремонтировать гидросооружения и поднять зябь;

- технология возделывания должна предусматривать запашку соломы и промежуточных культур или внесение навоза для компенсации отчуждаемой с урожаем органики;

- уровень грунтовых вод в межполивной период для восстановления плодородия длительно затопленных почв должен поддерживаться на глубине 1,3-1,5 м от поверхности земли.

Агромелиоративные требования. Технической основой орошения риса является рисовая поливная карта (РПК). Мелиоративное состояние почв на ней, и как следствие, уровень урожайности определяют параметры орошения и дренажа. Поэтому агромелиоративные требования к РПК отражают требования к ее регули-

рующей сети. Для поддержания почв в хорошем мелиоративном состоянии регулирующая сеть должна отвечать ряду требований:

1. Оросительная сеть должна обеспечивать затопление рисового чека за 20–24 ч, каждой отдельной карты – за 2–3 сут, а всей системы в целом – 14–18 сут. Для этого необходимо вводить водооборот: между чеками и на картовом оросителе – двухтактный, между оросителями на участковом распределителе – двух- или трёхтактный, между полями севооборота на хозяйственном распределителе – трехтактный.

2. Дренажно–сбросная сеть должна обеспечивать:

- отведение поверхностной воды в весенний предполивной период после выпадения обильных осадков за 1 сут;

- понижение УГВ после наклёвывания семян риса на глубину 40–50 см за 5–6 сут;

- предупреждение выклинивания грунтовых вод в период постоянного затопления посевов вдоль оросительных каналов и низких чеков при их террасном расположении и осуществлении 2–3 раза за сезон промывного режима со скоростью фильтрации в пределах 1–2 см/сут;

- поддержание уровня грунтовых вод в межполивной период на глубине 1,3–1,5 м.

3. Затворы гидротехнических сооружений и, прежде всего, водовыпусков из чека в сбросной канал, должны иметь уплотнения или другие средства для исключения протечки воды в период после обработки посевов пестицидами.

4. Среднее квадратичное отклонение отметок микрорельефа поверхности чека (показатель его выровненности) от средней плоскости не должно превышать $\pm (2,7-2,9)$ см.

5. При разработке проектов капитального ремонта рисовых систем трассы каналов и контуры рисовых чеков оставляются неизменными, допустимо лишь укрупнение отдельных мелких чеков (2–3 га) за счет их объединения.

6. В качестве основного способа орошения риса должно использоваться импульсное затопление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для внедрения изложенных научных достижений потребуется реконструкция регулирующей сети РОС, поставка новой мелиоративной техники и новый подход к организации водопользования на уровне подзаконного акта, что вместе взятое потребует финансирования этих мероприятий. Внедрение их в производство позволит расширить площадь посевов риса в крае до 150 тыс. га и довести его урожайность до уровня 8–8,5 т/га. Только в этом случае Кубань может выйти на устойчивое производство 1 млн. т риса [39].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович Л.Г. Уравнения математической физики / Л.Г. Абрамович, В. И. Левин. – М.: Наука, 1969. – 286 с.
2. Алеман Л.М. Рисовые оросительные системы Кубы / Л.М. Алеман // Бюлл. НТИ ВНИИ риса. – Краснодар, 1978. – Вып. XXII. – С. 85-88.
3. Алеман Л. М. Режим орошения риса в условиях Кубы / Л. М. Алеман, В. А. Попов // Бюлл. НТИ ВНИИ риса. – Краснодар, 1978. – Вып. 32. – С. 48–50.
4. Алёшин Е. П. Рис / Е. П. Алёшин, Н. Е. Алёшин. – Краснодар, 1997. – 504 с.
5. Гэлстон А. Жизнь зеленого растения / А. Гэлстон, П. Девис, Р. Сэттер. – М.: Мир, 1983. – 650 с.
6. Дэвис Д., Т. Рис. / Д. Дэвис, Д. Джованелли // Биохимия растений. Т.1 – М.: Мир, 1960. – С. 79.
7. Ерыгин П.С. Физиологические основы орошения риса / П.С. Ерыгин. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 208 с.
8. Даниэльс Ф. Курс физической химии / Ф. Даниэльс, Р. Альберти. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 628-640.
9. Зайцев В. Б. Рассказ о рисе / В. Б. Зайцев. – М.: Колос, 1971. – 168 с.
10. Зайцев В.Б. Рисовая оросительная система / В. Б.Зайцев. – М.: Колос, 1975. – 375 с.

11. Зайцев В.Б. Методы уменьшения отрицательного влияния террасности чеков на урожай риса / В. Б. Зайцев, В.А. Попов // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 10. – С. 47–52.
12. Замарин Е.А. Расчет флютбетов по методу гидродинамики / Е. А. Замарин // Гидротехнические сооружения. – М.: Гос. изд. с.-х. литературы, 1994. – С. 38-48.
13. Каюмов М.К. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур / М.К. Каюмов. – М.: Агропромиздат, 1989. – С. 3.
14. Краткий климатический справочник по странам мира. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
15. Конохова В.П. Опыт возделывания риса в США / В. П. Конохова. – М.: ВАСХНИИ, 1977. – 256 с.
16. Агроклиматология / Н. И. Синицына, И. А. Гольдберг, Э. А. Струнник. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
17. Кирьяков А.П. Термодинамика и молекулярная физика / А. П. Кирьяков, С. М. Коршунов. – М.: Просвещение, 1977, С. 137–148.
18. Либберт Э. Физиология растений / Э. Либберт; пер. с нем. – М.: Мир, 1970. – 580 с.
19. Монколебу С. Чудесный дар природы / С. Монколебу // Курьер ЮНЕСКО. Рисовые цивилизации. 1985. – №1. – С. 4–6.
20. Мелиоративное земледелие. – М.: Агропромиздат, 1986. – С. 48.
21. Наумов А.В. Дыхательный газообмен и продуктивность степных фитоценозов / А.В. Наумов. – Новосибирск: Наука, 1988. – 94 с.

22. Нгуу В. Н. Мировое производство риса и пути увеличения его роста / В. Н. Нгуу // Рисоводство. – 2007. – №10. – С. 8-11.
23. Нельсон-Скорняков Ф.Б. Фильтрация в однородной среде/ Ф.Б. Нельсон-Скорняков. – М.: Сов. наука, 1947. – 279 с.
24. Ничипорович А.А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах / А.А. Ничипорович // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – С. 5–35.
25. Никаноров Н.М. Гидрохимия / Н.М. Никаноров, Е.В. Посохов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 211 с.
26. Попов В. А. Планировка рисовых полей / В. А. Попов. – М.: Колос, 197. – 87 с.
27. Попов В.А. Методы повышения эффективности рисовых оросительных систем: дисс. ... д-ра техн. наук / В.А. Попов; Моск. гос. мелиор. ин-т – М., 1985.– С. 206–215.
28. Попов В.А. Физика и энергетика поглотительной деятельности корней риса / В.А. Попов //Вестник РАСХН. – 2005. – № 2. – С. 26–28.
29. Попов В.А. Физика, энергетика и биологическая продуктивность климата / В.А. Попов //Рисоводство. – 2008. – № 12. – С. 17–21.
30. Попов В.А. Дыхание – неизвестное свойство высших растений / В.А. Попов. – М., 1999. – 13 с. – Деп. во ВНИИТЭИ, аннотирована в 31 вып. Б.Д.В., №17838.

31. Попов В.А. Транспирация как генератор продукционного процесса / В.А. Попов // Мелиорация и водное хозяйство. – 1999. – № 3. – С. 33–34.
32. Попов В.А. Роль транспирации в продукционном процессе и задачи земледелия / В.А. Попов // Наука Кубани. – 1999. – №5. – С. 26–29.
33. Попов В.А. Гидрофизические и энергетические аспекты капитализации орошения / В.А. Попов // Устойчивое производство риса. – Краснодар, 2006. – С. 138–146.
34. Попов В.А. Регулирование грунтовых вод на рисовых системах/ В.А. Попов. – Краснодар, 1984. – 96 с.
35. Попов В.А. Эколого-биологические аспекты программирования урожаев / В.А. Попов // Вестник РАСХН. – 2003. – №1. – С. 35–37.
36. Попов В.А. Влияние внешних условий на транспирацию и урожайность риса / В.А. Попов, Л.Д. Квасинин // Рисоводство. – 2002.– №1. – С. 22–27.
37. Попов В.А. Физика и математическая модель транспирации риса / В.А. Попов, Л.Д. Квасинин // Рисоводство. – 2002. – №2. – С. 85–89.
38. Попов В.А. Гидрогеологические аспекты формирования грунтовых вод и проблема их рассоления на засоленных землях приморских низменностей стран СНГ / В.А. Попов, Н.В. Островский // Труды КубГАУ. – 2010. – №1(22). – С. 180–183.
39. Попов В.А. Водные и биологические аспекты устойчивого производства 1 млн т. кубанского риса / В.А. Попов, Н.В. Островский // Тр./ КубГАУ. – 2011. – №1(28). – С. 153-155.

40. Попов В.А. Форсированное затопление посевов риса как метод предупреждения вторичного засоления почв / В.А.Попов, Е.Ф.Шеховцов // Гидротехника и мелиорация. – 1981. – №3. – С. 78–80.
41. Почвоведение / коллект. авт. – М.: Агропромиздат, 1989. – 718 с.
42. Перельман В.И. Краткий справочник химика/ В.И. Перельман. – М.: Изд-во хим. лит-ры, 1955. – 559 с.
43. Поляков Л.А. Влажность воздуха над испаряющей поверхностью мезофильных клеток листа / Л.А. Поляков, Т.К. Карпушкин // Физиология растений, Т. 28, вып. 2. – М.: Наука, 1981. – С. 448–459.
44. Просунко В.А. Агроклиматические ресурсы и продуктивность риса/ В.А. Просунко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 110 с.
45. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полубаринова-Кочина. – М.: МГУ, 1979. – 368 с.
46. Рубин Б.А. Физиология и биохимия дыхания растений / Б.А. Рубин, М.Е. Ладыгина. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 542 с.
47. Реймерс Н.Ф. Природопользование / Н.Ф.Реймерс. – М.: Мысль, 1990. – 638 с.
48. Совершенствование рисовых систем Кубани / сост. В.А. Попов. – Краснодар, 1988. – 190 с.
49. Теория и практика выращивания риса (пер. с англ.) – М.: Колос, 1965. – 104 с.
50. Фамицын А.С. Обмен веществ и превращение энергии в растениях / А.С. Фамицын. – СПб, 1983. – 816 с.

51. Франц Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франц, Х.М. Торнли; пер. с англ. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.
52. Шамшин Д.Л. Физическая и коллоидная химия / Д.Л. Шамшин.– М.: Высшая школа, 1968. – 280 с.
53. Шамякин И.П. Мелиорация: энциклопедический справочник / И.П. Шамякин [и др.] – Минск: Совэнциклопедия, 1985. – 432 с.
54. Шестаков В.М. Динамика подземных вод / В.М. Шестаков. – М.: МГУ, 1979. – 368 с.
55. Шкийкис Ц.Н. Проблемы гидрологии дренажа/ Ц.Н. Шкийкис. – М.: МГУ, 1979. – 368 с.
56. Чирков Ю.И. Агрометеорология/ Ю.И. Чирков. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 109 с.
57. Хансен Л.Д. Связь между ростом растений и дыханием: экологические аспекты и отбор лучших сортов культурных растений / Л.Д. Хансен [и др.] //Физиология растений. – Т.43. – № 6. – М.: Наука, 1996. – 806 с.
58. Эзау К. Анатомия семенных растений / К. Эзау; перев. с англ. – М.: Мир, 1980. – 558 с.
59. Чеботарёв А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарёв. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – С. 291-292.
60. John C. O'Toole Rice and Water: The Final Frontier// The First International conference on Rice the Future. – 31 August – 2 September – Thailand – Bangkok, 2004.

61. ВСН-П-25-75. Инструкция по проектированию рисовых оросительных систем. Ведомственные строительные нормы. – Введ. 1975–05–01. – М.: Южгипроводхоз, 1975. – 50 с.
62. А. с. 1634182, Российская Федерация, МКИ А 01 G 25/00, Е 02 В 11/00. Закрытый дренаж для рисовых чеков / В.А. Попов, Ю.М. Ещенко; Всесоюз. науч.-иссл. ин-т риса и Кубан. гос. проект. и науч.-иссл. ин-т «Кубаньгипроводхоз». – № 4475338/15; заяв. 25.08.88; опубл. 15.03.1991, бюл. № 10.
63. А. с. 1236435, Российская Федерация, МКИ G 05 D9/00. Регулятор уровня в бьефах гидротехнических сооружений/ В.Т. Островский, А.В. Сербинов; Кубан. с.-х. ин-т. – № 3647210/24-24; заяв. 28.09.1983; опубл. 07.06.1986, бюл. № 21.
64. Пат. 2228537, Российская Федерация, МПК G 05 D 9/00, А 01 G 25/16. Автоматизированный чековый водовыпуск / В.Т. Островский, Н.И. Терещенко; заявитель и патентообладатель Кубан. гос. аграр. ун-т. – № 2002122477/12; заявл. 19.08.2002; опубл. 10.05.2004, бюл. № 13.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Табель примерного оснащения рисоводческой бригады мелиоративной техникой для поддержания внутрихозяйственной сети в хорошем техническом состоянии

Машина(марка)	Назначение	Количество
Экскаватор универсальный на пневмоколесном ходу	Очистка и углубление небольших каналов, отсечных дрен, устройство котлованов для капитального ремонта ГТС	1
Скрепер с емкостью ковша 2,75–3,0 м ³	Планировка рисовых чеков, отсыпка чековых валиков, ремонт дамб и картовых дорог	3
Планировщик, маловыравниватель, «движка», грейдер тяжелый	Планировка поверхности чека	1-2
Кротодренажная машина КН-1	Устройство кротового дренажа	1
Роторный каналокопатель МК-17, МК-23	Устройство и восстановление чековых канавок	1
Бульдозер Д-607	Засыпка траншей, котлованов, подпланировка углов чеков	1-2
Косилка канальная ККД-1,5, РР-22	Уничтожение сорной растительности	1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Примерная периодичность капитального ремонта рисовых систем

Сооружение, вид работ	Средний срок службы, лет	Периодичность капитального ремонта, лет
Гидротехнические сооружения на каналах с расходом, куб. м/с: 10-50 1-10 менее 1	50 40 20	15 10 7
Открытые каналы в земляном русле: - межхозяйственные оросительные - межхозяйственные коллекторно-дренажные - внутрихозяйственные оросительные и дренажные	100 30 30	10 10 10
Дороги: - гравийные - грунтовые профилированные	30 20	5 3
Мосты: - железобетонные и бетонные - деревянные	90 20	15 7
Гидрометрические посты на каналах	10	5
Капитальная планировка рисовых чеков	-	8-10

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Норма осушения рисовых полей в межполивной период

Почва по единой шкале Почвенного института	Содержание частиц физической глины, %	Норма осушения, м
Среднесуглинистая	30–40	1,5
Тяжелосуглинистая	41–50	1,6
Среднеглинистая	51–80	1,7
Тяжелоглинистая пылеватая и иловатая	81–100	1,8

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Расход воды через трубчатые водовыпуски в зависимости от диаметра трубы и величины напора, л/с

Перепад между уровнем воды в канале и чеке, см	Внутренний диаметр трубы, мм				
	195	243	279	322	500
10	29	44	58	98	238
12	31	49	64	107	268
14	33	52	68	116	283
16	36	56	73	124	298
18	38	59	77	131	320
20	48	62	98	138	335
30	68	97	129	170	410
50	108	140	184	225	526

Научное издание

Попов Вячеслав Алексеевич
Островский Николай Вячеславович

АГРОКЛИМАТОЛОГИЯ И ГИДРАВЛИКА
РИСОВЫХ ЭКОСИСТЕМ

Монография

Редактор – *Н.С. Ляшко*

Компьютерный набор и верстка – *Ж.В. Кизюн, А.А. Кирсанов*

Подписано в печать . Бумага

Формат 60×84 ¹/₁₆. Тираж 500 экз.

Усл.-печ. л. – 12. Учет.-изд. л. – 10,8. Заказ № .

Редакционный отдел и типография
Кубанского государственного аграрного
университета
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13