

Научно-информационный центр  
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии  
Центральной Азии

С. Ажмера, Р.К. Шривастава

**График вододеления по системе  
варабанди с учетом фильтрационных  
потерь в оросительной системе –  
исследование на конкретном примере**

Ташкент 2017

**Сунил Ажмера**, доцент

**Р.К. Шривастава**, профессор

факультет гражданского строительства и прикладной механики, Институт науки и технологий Шри Говиндрам Сексария (SGSITS)

**Аннотация**

Система варабанди для распределения оросительной воды применяется во многих частях Индии, включая в штате Мадхья-Прадеш. Было отмечено, что поля, находящиеся в хвостовой части, получают меньше воды, по сравнению с полями рядом с головой водоводов. Это объясняется фильтрационными потерями в необлицованных водоводах. Для улучшения подачи в хвостовую часть с учетом этих потерь, в данном исследовании сделана попытка модифицировать график водопользования в зоне распределительного канала массива орошения на реке Чорал в штате Мадхья-Прадеш.

Источник: Sunil Ajmera, R.K.Shrivastava. Water Distribution Schedule under Warabandi System considering Seepage Losses for an Irrigation Project-A case Study / International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET) Vol. 2 Issue 4 August 2013

## I. ВВЕДЕНИЕ

Важным аспектом управления оросительными системами является требование эффективного и справедливого распределения воды. Методы распределения воды влияют на работу оросительной системы и, в конечном счете, на эффективность использования воды в массиве орошения. Главной целью эксплуатации оросительной системы является подача воды по требованию и в надлежащее время. Искусство и наука распределения воды во времени и в пространстве называется планированием орошения. Для определения объема полива и его графика необходимо рассчитать требования культур на воду с учетом климата и влажности почвы. Для этого требуется расчет водопотребления культур в вегетационный период.

## II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Массив орошения на реке Чорал, находящийся около Мхау Техсил Индаура при департаменте водного хозяйства штата Мадхья-Прадеш был выбран для ситуационного исследования графика вододеления из распределительного канала «1L» в зоне его командования. Река Чорал, приток реки Нармада, берет начало в горах Виндхья и течет через округа Индаур и Кхаргон. Водохранилище Чорал расположено в деревне Рампурья при Мхау Техсил округа Индаур. Широта и долгота массива соответственно составляют  $75^{\circ}46'N$  и  $22^{\circ}25'E$ . Карта-схема массива Чорал показана на рис. 1. Участок расположения водохранилища Чорал находится на расстоянии 15 км от Мхау. Это трансбассейновый проект водозабора с площадью командования в бассейне Чамбала и водосборной площадью в бассейне Нармады. Земляная плотина высотой 27,82 м построена через реку с емкостью брутто  $21,91 \text{ млн.м}^3$ , полезным объемом  $17,21 \text{ млн.м}^3$  и мертвым объемом  $4,7 \text{ млн.м}^3$ . Состав культур в массиве орошения приведен в таблице 1. Площадь командования канала «1-L» равна 271 га. Вся площадь командования этого распределительного канала состоит из небольших наделов единоличных фермеров; минимальный размер надела равен 1,468 га, а максимальный – 6,152 га.

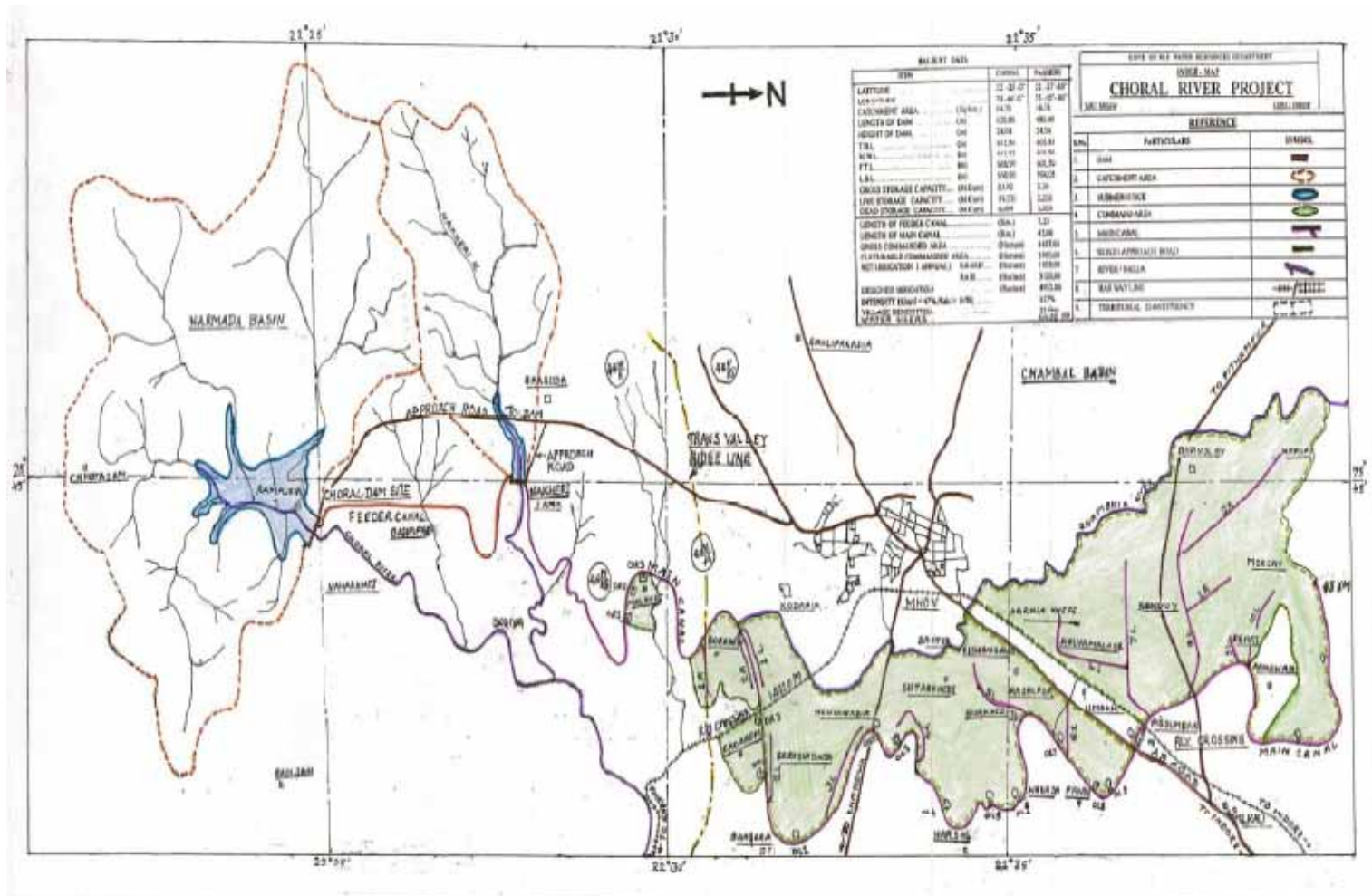


Рис. 1. Массив реки Чорал

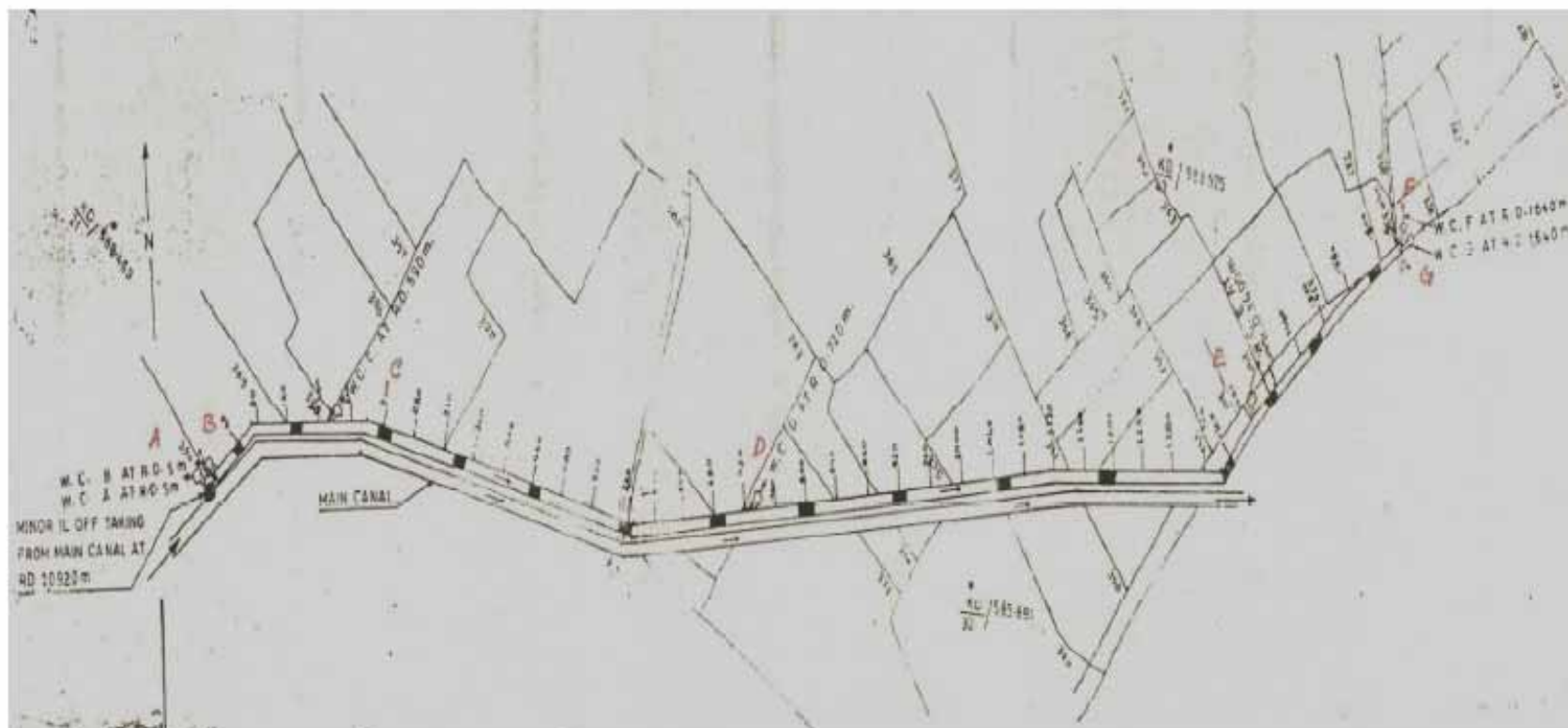


Рис. 2. Схема распределительного канала «1L» с указанием мест водовыпусков

Площадь командования канала разделена на семь Чаков; детальная информация по участкам по этим чакам приводится в таблице 2. Расположение водовыпусков по разным чакам показано на рис. 2.

Таблица 1

**Состав культур в изучаемой зоне командования**

Наименование	Площадь, га
<b>Летние культуры</b>	
- кукуруза	20
- сорго	15
- арахис	5
- овощи	7
<b>Зимние культуры</b>	
- пшеница	2145
- горошек	234
- картофель	585
- лук	78
- овощи	78

Таблица 2

**Информация по размерам наделов (га) в зоне командования канала «1-L»**

№	A	B	C	D	E	F	G
1	2,654	2,46	2,30	3,009	1,920	2,418	2,312
2	1,650	2,663	4,80	3,009	1,920	2,418	5,090
3	2,442	2,295	1,98	2,271	2,413	3,238	3,390
4	3,821	2,016	3,39	1,849	2,970	3,471	2,816
5	3,110	2,321	3,89	2,189	2,100	2,249	1,521
6	2,970	2,553	1,98	2,457	2,164	2,29	2,720
7	2,704	2,216	1,72	1,829	2,228	2,189	2,612
8	3,092	2,706	4,06	1,957	3,210	2,690	3,772
9	2,282	2,914	2,39	1,942	2,780	1,784	2,660
10	2,111	3,469	2,15	1,854	2,125	3,020	2,835
11	1,793	1,654	2,28	1,864	2,280	1,572	3,623
12	2,463	2,767	1,47	2,474	1,830	2,640	2,850
13		2,6	2,01	3,253		2,120	2,810
14		2,182	3,56	3,035		3,460	2,224
15		1,854	2,12	3,773			3,102
16		1,584	2,34	1,733			2,184
17			6,15				2,710
18			1,84				

№	A	B	C	D	E	F	G
19			2,78				
20			1,65				
21			3,13				
Всего	31,092	38,254	57,96	35,489	26,020	33,14	49,23

### III. СИСТЕМА ВАРАБАНДИ

Термин «варабанди» происходит от двух слов на местном диалекте – «вара» и «банди». Значение слова «вара» - очередь, а «банди» означает фиксацию. В целом, термин «варабанди» означает чередование водоподачи в соответствии с фиксированным графиком.

«Варабанди – это система справедливого распределения воды в порядке очереди в соответствии с предварительно установленным графиком, в котором указываются день, время и продолжительность подачи воды на каждый полив пропорционально размеру наделов в зоне командования водовыпускного сооружения».

Для осуществления Варабанди должны выполняться следующие базовые требования:

- (1) наличие сети полевых каналов, чтобы обеспечивать воду для каждого надела в пределах Чака.
- (2) обеспечение расчетного расхода в распределительном канале на каждом водовыпуске.
- (3) Участие фермеров.

#### *А. Термины, использованные в исследовании:*

##### *а. Вододеление*

Каждой единице возделываемой подвешенной зоны выделяется определенная доля стока воды, называемая нормой потребления воды, величина которой определяется путем нахождения определенного компромисса между требованиями и подачей воды. В основе этой нормы лежит пропускная способность полевых каналов и водоводов.

### ***б. Коэффициент использования***

Ни один из распределительных каналов не работает в течение всего вегетационного периода, и это не желательно с позиции контроля засоления и заболачивания. Отношение периода работы распределителя к общему вегетационному периоду называется «коэффициентом использования». Опять же это определенный компромисс между требованиями и подачей и он рассчитывается отдельно для каждой фазы роста сельскохозяйственной культуры. Этот коэффициент помогает в работе распределителей при заборе воды из водохранилища.

### ***в. Чаки***

Зона командования водовыпускного сооружения называется *чаком*. Чак – это функция нормы подачи на поле, пикового расчетного требования на оросительную воду в водовыпуске и рабочих характеристик системы. Чак дальше делиться на суб-чаки для лучшего планирования и управления.

### ***Б. Установление границ чака***

Эта важная работа при надлежащем выполнении обеспечит справедливое распределение воды в пределах чака. Оперативные работники департамента ирригации должны провести съемку чака на месте и зафиксировать его границы с учетом следующих моментов:

(1) при фиксировании границ чака для деревни, учитываются сухие русла, переезды, границы деревни, дороги, железнодорожные пути и т.д. Площадь чака ограничивается 60 гектарами.

(2) при нанесении границ чака некоторые дополнительные водовыпуски, существующие в пределах чака, должны быть удалены, а поливы должны производиться из санкционированного водовыпуска.

(3) сеть полевых каналов в пределах чака должна быть организована таким образом, чтобы каждый надел в чаке был соединен через полевой канал.



### ***В. Оросительный канал***

Размер оросительных каналов в распределительной системе должен быть таким, чтобы фермеры могли легко управлять стоком. Кроме того, он должен быть достаточным для достижения высокого КПД полива. Пропускная способность каналов должна обеспечивать пиковые требования на воду. Трасса водоводов фиксированная, имея в виду, что чак охватывает площадь до 60 га и что поверхность воды достаточно высокая для обслуживания поля с напором от 3 до 10 см. Глубина воды в водоводах может варьировать от 0,15 до 0,40 м. Скорость воды в водоводах должна быть менее 0,50 м/с. Длина водоводов может быть минимальной, для сведения к минимуму фильтрационных потерь. Трасса водовода прокладывается таким образом, чтобы он охватывал каждый надел и имел одну точку выдела на каждый надел. Эта точка выдела называется *накка* и график варабанди составляется по этим *накка*. Вода из водовода через полевой канал выделяется фермеру пропорционально его наделу на 7-дневной основе в интересах справедливости; надлежащий мониторинг всех водоводов должен проводиться в полной мере для этого 7-дневного периода.

### ***Г. Управление системой Варабанди***

Распределение воды в системе Варабанди представляет собой двухуровневый процесс, причем каждый уровень находится в ведении отдельного агентства. В верхнем уровне, управляемом штатом, все распределители и, следовательно, водоводы всегда используются в полную силу, без частичных сбросов. Это приводит к минимизации времени работы и потерь при транспортировке воды в распределителях. Распределение воды, поступающей из водовыпуска и текущей в водовод, является вторым уровнем распределения, и этот уровень находится в ведении фермеров и работников штата. Распределение воды осуществляется на 7-дневной ротационной основе с помощью утвержденного графика.

Когда распределитель работает, водовод получает утвержденную долю воды с постоянным расходом в течение суток, и распределение воды осуществляется от головы до хвостовой части. Время ротации продолжается, даже если распределитель закрывается, и в водоводе нет воды. Таким образом, каждый фермер имеет право получить всю воду в водоводе только в определенный день недели и в

определенное время, включая ночное. График водоподачи, указывающий время начала и закрытия для отдельного земельного надела, называется планом очередности водопользования. В этой системе не предусмотрена компенсация любому отдельному фермеру, который не смог получить воду в свою очередность по какой-либо причине, ввиду отсутствия нераспределенного времени.

#### ***Д. Время добегания стока при традиционной системе варабанди***

До того, как фермер сможет получить свою долю воду, он должен затратить некоторое время на наполнение своего водовода между точкой забора воды до точки выдела. Это время называется Бхараи, в рассматриваемом примере, оно берется равное 16.76 м/мин.

Один цикл ротации на водоводе или его ветке начинается от его головы, идет вниз по току воды и заканчивается в его хвостовой части. Подача должна прекращаться с головы водовода, когда наступает очередь последнего фермера, объем в верхней части, которая была заполнена за общее время наполнения (Бхараи), может быть сброшен только на его поле и, обычно, суммарное время, потраченное на ее наполнение, должно быть взыскано с него в обмен на это, и он получает всю эту воду с постоянным расходом. Когда подача отрезается с головной части, вода начинает уменьшаться в хвостовой части и постепенно приближается к нулю. Подобная водоподача, с нарушением лимита, является неэффективной с позиции подачи воды на поле. Фермеру необходимо компенсировать это, путем определенной скидки на взыскание времени Бхараи, и эта уменьшенная величина «Бхараи» называется «Джхараи». После уточнения Бхараи и Джхараи, время добегания (В.Д.) для единицы площади и для отдельного фермера задается следующими уравнениями:

$$\text{Время добегания для единицы площади} = \frac{168 - \text{общее Бхараи} + \text{общее Джхараи}}{\text{Общая площадь}}$$

и

$$\text{Время добегания для фермера} = \text{В.Д. единицы площади} \times \text{площадь надела} + \text{Бхараи участка фермера} + \text{Джхараи участка фермера}$$

### ***Е. Время добегания при модифицированной системе варабанди***

Сток в головной части разных полей не соответствует расходу водовыпускного сооружения вследствие фильтрационных потерь в водоводах. Поэтому важно учитывать фильтрационные потери для разных полей, чтобы определить фактическое значение стока воды, доходящего до поля. Фильтрационные потери значительно меняются во времени и в зависимости от типа почв, поэтому, их необходимо определять на местах. Эти потери также зависят от исходных условий влажности почвы, в которой проложен канал. Потери будут также выше, если интервал между последовательными эпизодами использования канала будет больше.

Сток, достигающий головных точек разных полей, задается формулой

$$Q_i = Q_0 - (0,0036 \times S \times P \times Wl_i)$$

где

$Q_i$  – сток, достигающий  $i$ -е поле (м<sup>3</sup>/час)

$Q_0$  – сток в водовыпускном сооружении (м<sup>3</sup>/час)

$S$  – скорость фильтрации (м<sup>3</sup>/с на 1 млн. м<sup>2</sup> смоченной площади)

$P$  – средний смоченный параметр водовода (м)

$Wl_i$  - длина водовода, соединяющего  $i$ -е поле с водовыпуском (м).

Коэффициент фильтрации – это отношение стока в водовыпуске и стока, достигающего поля.

Таким образом,

$$\text{Коэффициент фильтрации (SF)} = Q_0/Q_i$$

Чистое выделенное время для различных полей, определенное в соответствии с традиционной процедурой составления графика варабанди ( $NT_i$ ) было перемножено на соответствующий коэффициент фильтрации, и были получены значения уточненного чистого выделенного времени ( $RT_i$ ):

$$RT_i = NT_i \times SF$$

После определения уточненного чистого выделенного времени для различных полей в пределах площади, обслуживаемой водовыпускным сооружением, устанавливается поправочный коэффициент:

$$CF = \frac{\sum_{i=1}^n NT_i}{\sum_{i=1}^n RT_i}$$

Откорректированное чистое время полива (СТ) для разных полей определяется перемножением уточненного чистого выделенного времени и поправочного коэффициента:

$$CT_i = RT_i \times CF$$

Общее время, выделенное на каждое поле (ТТ<sub>i</sub>) в итоге определяется как:

$$TT_i = CT_i + F_i - D_i$$

где

$F_i$  – время Бхараи

$D_i$  – время Джхараи

На основе этого значения времени составляется график.

### ***Ж. График очередности***

Очередность фиксируется в порядке поступления заявок от головы до хвостовой части. Работа графика не представляет сложностей. Фермеры понимают, что не будет компенсации за пропущенную очередь и, поэтому, они избегают пропуска даже части своей очередности. Вода будет открыта на такой период времени, что около 50% требований культур на воду суб-чака будет реализовано. Одновременно оставшийся отвод того же чака будет оставаться закрытым. Таким образом, в один цикл длительностью 7 дней все суб-чаки одного и того же чака получают около 50% двухнедельных

требований на воду. Во вторую очередь ротации, или цикл из семи дней, двухнедельные требования культур на воду чакка будут полностью реализованы.

#### IV. ТРЕБОВАНИЯ КУЛЬТУР НА ВОДУ

«Требования культур на воду» были определены для различных культур, рассмотренных в проектной зоне. Оценка требований на оросительную воду включает в себя определение индивидуальных потребностей (SPL), эвапотранспирации культур (ЕТс), коэффициента культуры (Кс), эталонной эвапотранспирации (ЕТо) и эффективных осадков (ER) в проектной зоне. Значение SPL для отдельных культур было определено с использованием сложившейся практики в Департаменте водных ресурсов Правительства штата Мадхья-Прадеш.

Метод ФАО Пенмана-Монтейта (Allen et al., 1998) используется для расчета эталонной эвапотранспирации культуры (ЕТо) из метеорологических данных вблизи проектной зоны. Расчетные значения ЕТо затем перемножались на коэффициенты культур Кс, чтобы получить эвапотранспирацию культуры (ЕТс) по отдельным культурам. Значение коэффициента культуры Кс также бралось из сборника ФАО 56.

Оценка эвапотранспирации культуры ЕТс состоит из:

1. Установления стадий роста культуры с определением их длительности и выбора соответствующего коэффициента Кс,
2. Построения кривой культуры для определения значения Кс для любого отрезка времени вегетационного периода,
3. Вычисления ЕТс по стадиям роста как произведения ЕТо и Кс,

С учетом приведенного выше, определялись двухнедельные требования культур на воду для зимних посевов, допуская, что эффективные осадки и вклад грунтовых вод равны нулю. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Валовые требования культуры на воду в га-м на участок площадью 1000 га

№	С/х культура	Площадь га	Октябрь		Ноябрь		Декабрь		Январь		Февраль		Март
			I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I
1	Пшеница	687,5	0,00	0,00	41,25	11,88	21,07	23,69	32,49	37,24	44,13	44,51	29,43
2	Нут	75	4,50	1,73	1,41	2,36	2,17	2,72	3,25	3,66	3,71	3,61	0,00
3	Картофель	187,5	0,00	11,25	4,41	4,94	6,19	6,76	8,89	9,97	9,34	0,00	0,00
4	Лук	25	1,50	1,01	1,02	1,00	1,04	1,01	1,08	1,23	1,42	1,58	1,55
5	Овощи	25	0,00	1,50	0,82	0,95	0,93	1,01	1,06	0,36	0,00	0,00	0,00
	<b>Всего</b>	1000	6,00	15,50	48,91	21,13	31,40	35,19	46,77	52,47	58,60	49,69	30,99

## **V. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ПЛАНИРОВАНИЯ**

### ***A. Сеть каналов***

Пиковые требования на воду были рассчитаны на водовыпускном сооружении с использованием максимального значения двухнедельный требований на воду для сезона Раби, которое составляет 58,60 га-м для первых (I) четырнадцати дней февраля. КПД полевого канала и КПД полива берутся равными 90%, также добавляются 2% на потери. С учетом этого значение пикового расхода, необходимого в водоводе в голове распределителя, будет составлять 0,610 л/с/га.

### ***B. Установление границ чак***

Границы чак и суб-чак установлены в руководстве, как описано в разделе III.B. Всего семь чак рассматривалось для проектирования модифицированной системы варабанди в зоне командования распределителя 1-L проекта Чорал. Схема чак 'А' приведена на рис.3.

### ***B. Конструкторские расчеты***

#### ***a. Параметры для проектирования водовода и полевого канала***

Вся площадь, рассматриваемая для целей планирования, разделяется на чаки и суб-чаки. После этого, определяется трасса сети водовода и полевых каналов. Водовод и полевой канал проектировались с пропускной способностью 0,61 л/с/га. Ширина по дну 0,30 м, глубина воды берется равной 0,20 м, боковые откосы составляют 1,5:1, а смоченный периметр равен 1,021 м. Облицовка водовода и полевого канала не предусматривается. Значение коэффициента шероховатости берется равное 0,018. Полевые дрены и коллектора трассированы в соответствии с топографией. Схема водовода и полевого канала для чак «А» показана на рис.3.

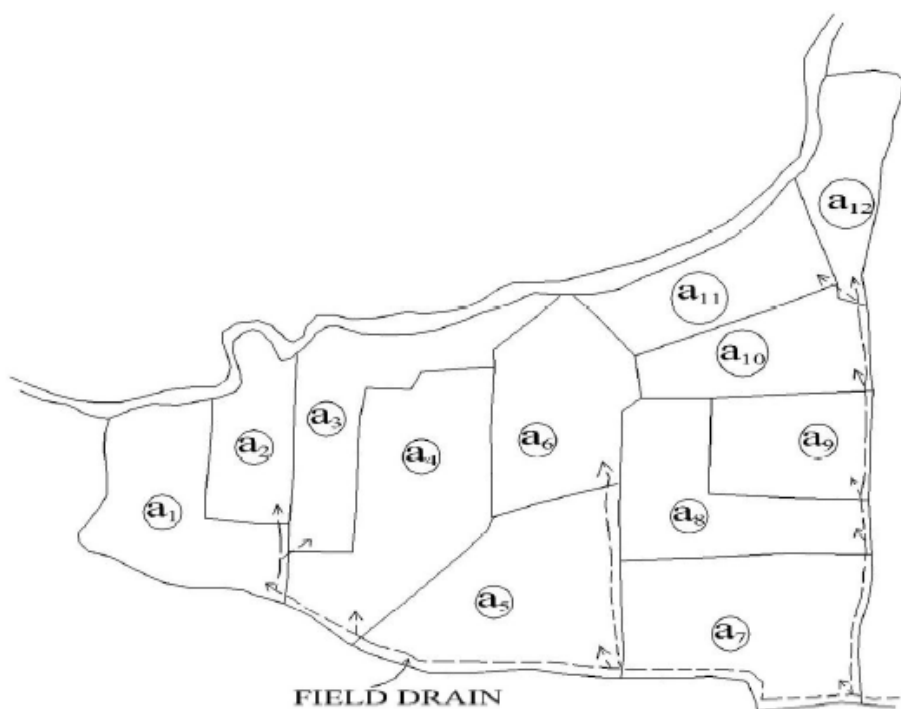


Рис. 3. Схема суб-чаков, водовода и полевых дрен для чак-А

### *Г. Расчеты графика для традиционного варабанди*

Выделение очередности производится таким образом, чтобы выделять каждому фермеру объем воды, пропорциональный площади земельных владений в зоне командования водовыпускного сооружения. Предлагаемое управление водой предусматривает работу всей транспортирующей системы с учетом обеспечения максимального расхода во всех каналах в периоды пикового спроса. Магистральный канал, распределители и водоводы будут работать в полную меру в течение 14 дней. Полный график, подготовленный для чак «А», приведен в таблице 4, аналогичные расчеты выполняются и для других чак.



Таблица 4

## График распределения воды по традиционной и модифицированной системе варабанди для чака «А»

№ поля	Площадь, га	Рабочая длина водово- да, м	Время	Время	Чистое выделен. время, час	Общее время, час	Ожидаемый расход, м3/час	Уточненное чистое выделенное время, час	Откоррект чистое выделен. время, час	Общее выдел. время, час	
			наполнения водовода, час	спуска воды с водовода, час							(NTi)
a7	2,474	926	0	0,92	0	16,58	17,50	49,17	18,41	15,55	16,47
a8	2,163	210	0	0,21	0	14,49	14,70	47,94	16,51	13,94	14,15
a9	1,826	90	0	0,09	0	12,23	12,32	47,41	14,09	11,90	11,99
a10	1,689	126	0	0,13	0	11,31	11,44	46,67	13,24	11,18	11,31
a12	1,970	138	0	0,14	0	13,20	13,34	45,86	15,72	13,28	13,42
a11	1,434	36	600	0,04	0,3	9,61	9,35	45,65	11,50	9,71	9,45
a5	2,488	346	0	0,35	0	16,67	17,02	47,14	19,31	16,31	16,66
a6	2,376	260	260	0,26	0,13	15,92	16,05	45,61	19,06	16,10	16,23
a4	3,057	340	0	0,34	0	20,48	20,82	45,14	24,78	20,93	21,27
a1	2,123	113	0	0,11	0	14,22	14,33	44,48	17,47	14,75	14,86
a3	1,954	64	0	0,06	0	13,09	13,15	44,10	16,22	13,69	13,75
a2	1,320	41	1830	0,04	0,92	8,84	7,96	43,86	11,01	9,30	8,42
<b>ВСЕГО</b>	<b>24,874</b>	<b>2690</b>	<b>2690</b>	<b>2,69</b>	<b>1,35</b>	<b>166,66</b>	<b>168,00</b>		<b>197,34</b>	<b>166,66</b>	<b>168,0</b>

Таблица 5

Сравнение графика распределения воды по традиционной и модифицированной системе варабанди для чака «А»

№ поля	Площадь	Расход, м <sup>3</sup> /га	Традиционное варабанди		Модифицированное варабанди	
			Время, час	Водоподача, м <sup>3</sup>	Время, час	Водоподача, м <sup>3</sup>
a7	2,47	49,17	17,50	860,27	16,47	809,78
a8	2,16	47,94	14,70	704,82	14,15	678,57
a9	1,83	47,41	12,32	584,16	11,99	568,49
a10	1,69	46,67	11,44	534,14	11,31	528,02
a12	1,97	45,86	13,34	611,85	13,42	615,43
a11	1,43	45,65	9,35	426,85	9,45	431,49
a5	2,49	47,14	17,02	802,30	16,66	785,45
a6	2,38	45,61	16,05	732,00	16,23	740,25
a4	3,06	45,14	20,82	939,90	21,27	960,15
a1	2,12	44,48	14,33	637,58	14,86	661,10
a3	1,95	44,10	13,15	579,99	13,75	606,56
a2	1,32	43,86	7,96	349,30	8,42	369,38
<b>Всего</b>	<b>24,87</b>		<b>168,00</b>	<b>7763,17</b>	<b>168,00</b>	<b>7754,67</b>

#### ***Д. Расчет графика по модифицированному методу варабанди***

Справедливое распределение воды каждому фермеру, особенно фермерам в хвостовой части, невозможно вследствие фильтрационных потерь по всей длине канала. Таким образом, необходимо модифицировать разработанную систему традиционного варабанди, чтобы можно было достичь цели справедливого распределения каждому фермеру в соответствии с его земельным наделом, независимо от расположения этого надела в орошаемом массиве. С учетом скорости фильтрации  $1,6 \text{ м}^3/\text{с}/\text{млн.м}^2$  увлажненного периметра для эродированной почвы, подготовлен модифицированный график для чака «А» и показан в таблице 4. Аналогичные расчеты сделаны также для других чак. Сопоставление водоподачи по традиционной и модифицированной системе варабанди приведено в таблице 5.

#### **V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты графика полива по традиционной и модифицированной системе варабанди приведены в таблице 5 для чака в зоне командования распределителя «1L», т.е. в зоне исследования. Результаты показывают, что перерасчет времени при использовании модифицированной системы варабанди с учетом фильтрационных потерь по длине канала обеспечит надлежащий объем воды по требованиям даже фермерам в хвостовой части канала, что было невозможным при традиционной системе варабанди.

Перевод: Усманова О., Насимова А.

Верстка: Беглов И.

Подготовлено к печати  
в Научно-информационном центре МКВК

Республика Узбекистан, 100 000,  
г. Ташкент, ул. Асака, д. 3  
Тел. (998 71) 268 97 23  
Эл. почта: vdukhovniy@gmail.com