

ПРОГРАММИРОВАНИЕ УРОЖАЕВ И УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМ РЕЖИМОМ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

Ботнаръ В.Ф.

Институт генетики и физиологии растений Академии Наук Молдовы

Реализацию метода программирования урожаев сельскохозяйственных культур рационально осуществлять в два этапа - в виде разработки проектных уровней урожайности и решения задач по оптимизации технологических параметров возделывания культур в условиях конкретного года [3, 5]. Теоретические основы метода расчета проектных уровней урожайности изложены в работах *Тооминга* [9] и *Жуковского* [4], а процедура оптимизации технологического процесса, как задача минимизации затрат при управлении динамическим объектом, разработана *Сиротенко* [7, 8].

В данной работе мы попытались изложить особенности количественного определения проектных уровней урожайности овощных культур в условиях орошаемого земледелия Республики Молдовы и на примере овощного гороха показать возможности оптимизации и управления водным режимом с помощью имитационной модели продукционного процесса.

Материалы и методы

В основу исследований положено комплексное обобщение технологических и биолого-агрометеорологических экспериментов, проведенных автором по ряду овощных культур и дальнейшее использование полученной информации с целью программирования урожаев. Материалом для исследований являются:

- показатели урожайности овощных культур;
- данные фенологических наблюдений в посевах овощного гороха, биометрические показатели продуктивности - общая растительная масса растений и ее приросты по органам, площади фотосинтезирующих поверхностей;
- данные водобалансовых исследований, которые включают динамику запасов продуктивной влаги, атмосферных осадков, количество поливной воды,

испарения с поверхности почвы под растениями и транспирацию;

- агроклиматическая информация в виде среднесуточных значений температуры воздуха, осадков, дефицита влажности воздуха и часов солнечного сияния за период с 1952 по 2008 г;

- гидрологические константы почв опытных участков: объемная масса, наименьшая влагоемкость и влажность завядания (ВЗ) по десятисантиметровым слоям почвенного профиля до глубины 1,5 м.

Для вычисления урожайности сельскохозяйственных культур скомпонована функционально действующая система обработки биологической, агроклиматической и технологической информации в виде соответствующих баз данных. Параметры динамической модели идентифицированы с учетом биологических особенностей гороха овощного.

Результаты и обсуждение

Оценка территории по потенциальному и действительно возможному урожаю является ориентиром, указывающим, в каких пределах сами хозяйства могут программировать урожаи при намеченном коэффициенте полезного действия посевов. В основу такой оценки положена обеспеченность периода вегетации основных сельскохозяйственных культур светом, теплом и влагой.

Климатические параметры территории возделывания сельскохозяйственных культур обладают большой изменчивостью. В отдельные годы колебания сумм температур достигают нескольких сот градусов. Особенно жаркими оказались последние годы (1999-2003, 2007 и 2008). Многообразии изменений температуры воздуха в конкретных природных условиях необходимо оценивать по суммарной повторяемости (обеспеченности) значений данного элемента выше или ниже определенного предела. При средней сумме 3300⁰С последняя в отдельные годы изменяется от 2900 до 3650⁰С. Сумма более 3200⁰С обеспечена лишь на 70%, то есть семь лет из десяти характеризуются температурами не ниже указанной величины.

Молдова расположена в зоне недостаточного увлажнения, поэтому ресурсы влаги являются важным фактором, определяющим величину урожайности основных сельскохозяйственных культур. Общее представление об увлажнении территории дают сведения об атмосферных осадках.

За период наблюдений их годовые суммы достигали 620-850 мм, при минимальных значениях 210-430 мм. Около половины годового количества осадков с небольшими исключениями, выпадает в мае-августе в виде кратковременных ливней, обуславливающих интенсивную водную эрозию почв.

Классификация периодов (апрель-сентябрь) по естественной влагообеспеченности показывает, что на территории республики влажным условиям соответствует обеспеченность 0-17,5%, средневлажным - 17,7-37,5, средним 37,5-62,5, среднесухим - 62,6-87,5, сухим - 82,5-100%. Во второй декаде мая, к примеру, при норме 14 мм наиболее вероятными являются условия от средневлажных (25 мм) до средnezасушливых (3 мм). В средние годы выпадение осадков от 9 до 18 мм, вероятно, не чаще, чем в 4-6 годах из 10. Потенциальный уровень продуктивности сельскохозяйственных культур определяется поступлением фото-

синтетически активной радиации (ФАР) и коэффициентом ее использования посевами (КПД ФАР). На территории Молдовы за время вегетации овощных культур (апрель-октябрь) приход ФАР достигает 20 и более млрд. кДж/га. Для учета суммарной интенсивности ФАР, за период активной вегетации овощных культур ($Q_{\text{фар}}$) для условий юго-восточной зоны республики выведена линейная статистическая зависимость между приходящей ФАР и количеством часов солнечного сияния. Связь между декадными значениями этих переменных в июне-августе очень тесная ($r=0,97 + 0,03$) и описывается уравнением:

$$Q_{\text{фар}} = (0,026SS + 2,518) K_1 K_2,$$

где SS - количество часов солнечного сияния за декаду, K_1 - коэффициент перевода в значение ФАР (равен 0,5); K_2 - коэффициент перевода в кДж/га (равен $4,19 \cdot 10^8$). Эффективность использования ФАР во многом определяется обеспеченностью посевов влагой и доступными формами элементов минерального питания.

При средней удельной теплоте сгорания единицы сухого вещества растений 16,75 кДж/г и утилизации посевами перца 2% от приходящей за период активной вегетации суммарной энергии (11,51 млрд.кДж/га) формируется следующее количество сухой фитомассы (потенциальная урожайность):

$$ПУ = \frac{11,51 \cdot 10^9 \text{ кДж} / \text{га} \cdot 2\%}{10^5 \cdot 16,75 \cdot 10^3} = 13,74 \text{ т} / \text{га}$$

Учитывая, что коэффициент хозяйственной эффективности ($K_{\text{хоз}}$) перца сладкого в зависимости от сорта и условий выращивания составляет 0,4-0,5, а количество сухих веществ в плодах равно 8%, нетрудно вычислить хозяйственно-ценную часть урожая:

$$У_{\text{хоз}} = \frac{13,74 \text{ т} / \text{га} \cdot 100}{8} \cdot 0,45 = 77,3 \text{ т} / \text{га}$$

Однако, в производственных условиях такой выход общей фитомассы и хозяйственно-ценной ее части трудно реализуем. Расхождение теории с практикой объясняется тем, что существует ряд факторов, снижающих эффективность использования посевами фотосинтетически активной радиации. По своей природе их можно разделить на две группы: ограничивающие факторы биологического происхождения, присущие данному генотипу, которые определяются особенностями архитектуры растений и функциональной активностью их фотосинтетического аппарата и ограничивающие факторы внешней среды (слишком низкая или, наоборот, высокая температура воздуха и почвы, недостаточное обеспечение растений продуктивной влагой, элементами минерального питания, углекислым газом, повреждение растений вредителями, поражение болезнями и др.). И если первая группа факторов - удел физиологов, генетиков, селекционеров, то управление второй группы зависит от квалификации технологов.

Анализ результатов многолетних опытов показывает, что посеы овощных культур при высокой агротехнике могут утилизировать в зависимости от вида до 1-2% ФАР (таблица 1). Согласно закону взаимодействия факторов, использование растениями солнечной энергии, как и любого иного фактора, тем полнее и эффективнее, чем лучше они обеспечены всеми остальными. Следовательно, получение максимальной продуктивности посева требует доведения значений и параметров управляемых факторов до уровня, который обеспечил бы наилучшую отзывчивость растений на неконтролируемые условия внешней среды. Особенно важно оптимизировать действия факторов, находящихся в минимуме.

Таблица 1. Урожай овощных культур и коэффициент использования ФАР

| Культура | Урожай, т/га | % сухого вещества | $K_{хоз}$ | КПД ФАР,% |
|----------------------|--------------|-------------------|-----------|-----------|
| Томат: | | | | |
| рассадный | 53,0 | 5,5 | 0,48 | 0,94 |
| безрассадный | 89,2 | 5,5 | 0,48 | 1,27 |
| Перец сладкий | 36,3 | 8,0 | 0,45 | 0,94 |
| Баклажан | 45,0 | 8,5 | 0,40 | 1,20 |
| Огурец | 40,1 | 4,5 | 0,40 | 1,01 |
| Овощной горох | 12,0 | 20,0 | 0,32 | 1,55 |
| Капуста: | | | | |
| ранняя | 46,0 | 7,3 | 0,40 | 1,81 |
| средняя | 65,0 | 7,5 | 0,45 | 1,88 |
| поздняя | 95,0 | 8,0 | 0,48 | 1,85 |
| Лук | 37,2 | 15,0 | 0,68 | 1,10 |
| Морковь | 79,0 | 11,0 | 0,70 | 1,60 |

В условиях Молдовы для овощных культур чаще всего в минимуме находится обеспеченность растений водой и питательными веществами. К примеру, по средним многолетним данным, за период вегетации перца сладкого в виде осадков выпадает 2600 м³ на гектар. Около 30% осадков, в основном ливневого характера, расходуется на сток и испарение с поверхности почвы из-за неполного смыкания растений в междурядьях. Следовательно, для роста и развития растений остаются 1800 м³/га.

Учитывая, что для формирования 1 тонны сухой фитомассы или 8,7 тонн товарной продукции требуется 1000-1250 м³ воды, нетрудно определить возможный урожай. Элементарный расчет показывает, что естественный запас продуктивной влаги в почве не обеспечивает формирования высокого урожая данной культуры. Следовательно, получение высоких и стабильных урожаев овощей возможно лишь при наличии гарантированного орошения.

Однако, даже в условиях орошаемого земледелия, далеко не всегда основные факторы жизни растений находятся в оптимуме. Поэтому определение действительно возможного урожая (ДВУ) предусматривает учет почвенно-климатических условий зоны при своевременном и качественном выполнении всех технологических мероприятий. Такая величина урожайности ниже

потенциальной и представляет уровень, к которому необходимо стремиться при составлении хозяйственных планов.

Существует ряд методов определения ДВУ: по коэффициенту увлажнения, биоклиматическому потенциалу, гидротермическому потенциалу продуктивности растений и других. Учитывая почвенно-климатические условия основных овощеводческих районов республики, нами проведены расчеты ДВУ с учетом коэффициента увлажнения, так как этот показатель характеризует не только конкретные условия водного режима, но и тепловой режим поля [2]. Коэффициент увлажнения (K_y) определяется как отношение суммарного испарения с поверхности поля к испаряемости с водной поверхности. Следовательно, ДВУ может быть представлено выражением: $ДВУ = ПУ \cdot K_y$, а недобор урожая (Δy), обусловленный дефицитом влаги: $\Delta y = ПУ - ДВУ$.

Реальное представление о ДВУ дают лучшие варианты полевых многофакторных опытов (табл.1), в которых обеспеченность растений водой и питательными веществами, обработка почвы, борьба с вредителями и болезнями находилась на высоком агротехническом уровне.

Разность между климатически обеспеченной урожайностью (КОУ) и ДВУ показывает нереализованные климатические условия зоны, а между ДВУ и УП (урожай в производстве) - погодно-агротехнические ресурсы. Коэффициент благоприятности климата учитывается отношением ДВУ и ПУ, а коэффициент соблюдения агротехнических требований - УП к ДВУ. Недобор урожая перца сладкого, рассчитанный по приведенному выше выражению, составляет 15,4 т/га, томата рассадного и безрассадного соответственно - 22,4 и 28,2, огурца - 16,0 т/га, при коэффициенте благоприятности климатических условий - 0,8.

Для реализации проектных уровней урожайности в условиях конкретного года необходим глубокий анализ количественных закономерностей роста, развития и продуктивности растений, влияния условий среды на энерго- и массообмен в системе «почва-растение-атмосфера». Всестороннее обобщение такой информации стало возможным после разработки количественной теории продуктивности агроэкосистем [1, 2, 3, 6].

Несмотря на перспективность использования динамических моделей для программирования урожая, на практике, из-за отсутствия необходимых прикладных расчетных схем, этот подход не получил еще достаточного распространения. Для овощных культур подобных методов не существует вообще.

Ниже, на примере овощного гороха, показана принципиальная возможность оптимизации и управления продукционным процессом с помощью имитационного метода. В основу последнего положена динамическая модель продуктивности культуры. Структура модели представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, численное интегрирование которых позволяет рассчитывать динамику биомассы растений по отдельным органам и влажность почвы по слоям в течение вегетационного периода. Система уравнений имеет вид:

$$\frac{dM_p}{dt} \alpha_p (1 - R_G)(F + Q) - D_p - q_p - P_p, \quad \frac{dwi_p}{dt} q_{i-1} - q_i - TRi - \delta_i E$$

Где:

M_p - биомасса листьев (P=1), стеблей (P=3), створок (P=4), семян (P=5) с единицы площади посева гороха; α_p - система ростовых функций

($\alpha_p \geq 0, \sum_{p=1}^5 q_p$), R_G - коэффициент дыхания роста, F – суммарный фотосинтез посева,

Q- суммарный распад структурной массы ($Q = \sum_{p=1}^5 q_p$), D_p - дыхание поддержания,

P_p – скорость опадания фитомассы, w_i – влагозапасы i-ого слоя почвы (i=1-15, толщина слоя 10 см), q_{i-1} , q_i - потоки воды через верхнюю и нижнюю границы i-ого слоя, E - испарение с поверхности почвы, δ_i - логическая переменная ($\delta_i = 1$, если i=1 и $\delta_i = 0$ для остальных слоев), t - время.

Система расчетов интегрируется численно с шагом по времени сутки от появления всходов до созревания семян. Начальные условия для биомассы и запасов влаги задаются на день появления массовых всходов. Для расчетов необходимы средние суточные значения температуры и дефицита влажности воздуха, количества часов солнечного сияния и осадков. Выходная информация - динамика биомассы растений по органам, конечная урожайность, а также динамика составляющих водного баланса почвы в течение вегетации.

Модель идентифицирована для овощного гороха по материалам наблюдений многофакторного полевого эксперимента, проведенного на юго-восточной территории Республики Молдова. Установлено, что достаточно надежные значения параметров ростового блока можно получить, используя результаты полевых наблюдений не менее чем за два контрастных года по агрометеорологическим условиям. В таблице 2 приведены значения ростовых функций, вычисленные в результате обработки экспериментальных данных.

Таблица 2. Параметры ростовых функций по основным фазам развития овощного гороха

| Элемент | Фазы развития растений | | | | | |
|---------------|------------------------|----------|----------|-------------|----------|------------|
| | всходы | 3-й лист | 7-й лист | бутонизация | цветение | созревание |
| α_l | 0,64 | 0,62 | 0,58 | 0,55 | 0,33 | 0,00 |
| α_s | 0,03 | 0,05 | 0,15 | 0,34 | 0,14 | 0,01 |
| α_{st} | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,03 | 0,46 | 0,03 |
| α_f | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,06 | 0,96 |
| α_r | 0,33 | 0,33 | 0,27 | 0,08 | 0,01 | 0,0 |

Примечание: $\alpha_l, \alpha_s, \alpha_{st}, \alpha_f, \alpha_r$ - ростовые функции листьев, стеблей, створок, зерна и корней.

Графическое изображение ростовых функций показано на рисунке 1. Несмотря на то, что ростовые функции, как и другие показатели, в некоторой степени зависят от условий возделывания, их характер, в первую очередь, определяется генетическими особенностями культуры и сорта.

При этом заметим, что речь идет о консервативном характере лишь формы кривых, тогда как их взаимное расположение всецело зависит от изменений условий внешней среды. Это обстоятельство причиняет известные неудобства, так как во многих случаях для их уточнения необходимо закладывать специальные дорогостоящие опыты.

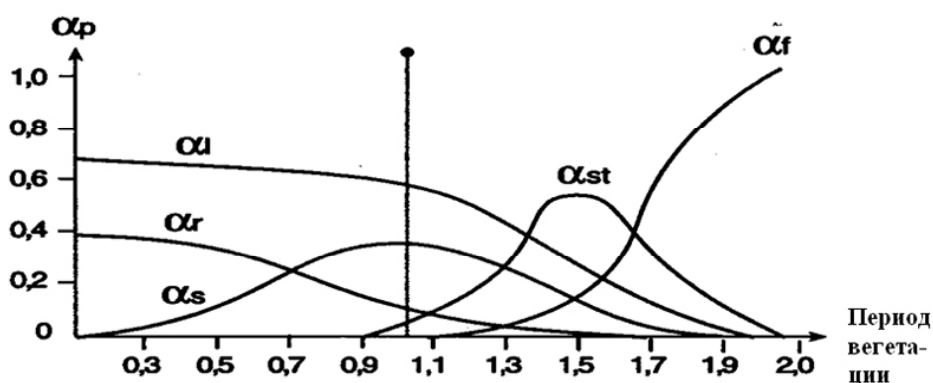


Рис. 1. Ростовые функции овощного гороха: α_l -листья, α_s -стебли, α_r -корни, α_{st} -створки, α_f -зерна

Проверка модели на материалах, которые не использовались для ее разработки, показала, что рассчитанная влажность почвы достаточно адекватно реагирует на атмосферные осадки и вегетационные поливы. Модель воспроизводит динамику суммарного суточного испарения с ошибкой не выше 25%, влагозапасов не выше 12% при орошении и 25% - без применения поливов. Биомасса и площадь листьев растений рассчитывается с точностью 6-9%. Межгодичная изменчивость урожайности бобов и семян гороха в условиях орошения, по результатам расчетов за ряд лет воспроизводится с помощью модели с точностью 15-20% (таблица 3). Выявлена высокая чувствительность модели к различным режимам влагообеспеченности (предполивная влажность 60, 70 и 80% от наименьшей влагоемкости НВ).

В таблице 4 приведены результаты численных экспериментов по поиску оптимального водного режима на планируемый уровень урожая, путем имитации пробных поливов нормой 10 мм при пятисуточном шаге по времени. Расчеты показали, что без орошения в условиях сухого года посеы овощного гороха формируют урожай стручков на уровне 2,0 т/га. За счет проведения одного полива нормой 10 мм максимальная прибавка 0,6 т стручков с гектара формируются при его назначении на 51 день от даты появления всходов. Положительное действие одноразового полива ограничивается нормой 30 мм. Дальнейший рост урожая (у) обеспечивается повышением оросительной нормы (М), но при этом увеличивается кратность поливов, меняются сроки их проведения.

Таблица 3. Фактическая и рассчитанная по модели урожайность овощного гороха

| Год | Естественная влагообеспеченность периода вегетации | Фактическая урожайность, т/га | | Рассчитанная урожайность при 70% НВ, т/га | |
|------|--|-------------------------------|-------|---|-------|
| | | зеленых зерен | семян | зеленых зерен | семян |
| 1980 | Влажный | 6,6 | 2,9 | 7,1 | 3,4 |
| 1981 | Среднесухой | 6,3 | 3,7 | 7,1 | 3,4 |
| 1982 | Средневлажный | 5,8 | 2,9 | 6,4 | 3,1 |
| 1983 | Средний | 6,0 | 3,1 | 6,8 | 3,3 |
| 1984 | Влажный | 6,2 | 2,9 | 6,8 | 3,3 |
| 1986 | Сухой | 5,6 | 2,7 | 5,8 | 2,8 |
| 1987 | Среднесухой | 5,8 | 2,8 | 6,0 | 2,9 |
| 1997 | Влажный | 5,4 | 2,4 | 5,6 | 2,7 |
| 1998 | Средний | 5,5 | 2,3 | 5,6 | 2,6 |
| 1999 | Средний | 5,1 | 2,4 | 5,2 | 2,5 |
| 2000 | Сухой | 5,0 | 2,1 | 5,2 | 2,5 |
| 2001 | Средневлажный | 6,5 | 2,9 | 6,5 | 3,1 |
| 2006 | Средний | 5,8 | 3,0 | 6,1 | 3,1 |
| 2007 | Очень сухой | 3,2 | 1,4 | 3,8 | 1,7 |
| 2008 | Средневлажный | 6,3 | 2,7 | 6,3 | 3,0 |

Оптимизация водного режима посевов решена путем минимизации затрат поливной воды на формирование заданного уровня урожая гороха. Для этой цели использован алгоритм, разработанный во РНИИСХМ [9]. На рисунке 2 в качестве примера решения задачи, определен оптимальный график поливов на получение возрастающих уровней урожайности - 4,5; 6,0; 9,0; 12,0; 13,0 т/га стручков для условий сухого по влагообеспеченности года. Минимальный суммарный расход воды под планируемые уровни урожая составил соответственно 30, 50, 80, 110 и 120 мм. Экономия поливной воды за счет минимизации оросительных норм достигает 27%. Кроме того, управление водными ресурсами замедляют процессы засоления почв, вымывания минеральных удобрений, загрязнения водных источников.

Эффективность данного метода состоит и в том, что он позволяет последовательно в каждом из циклов расчета находить чувствительные фазы в онтогенезе культуры и тем самым достичь наиболее крутой траектории повышения урожайности. Данное обстоятельство позволяет рассматривать его как объективный способ выявления и оценки критических периодов в процессе роста и развития растений.

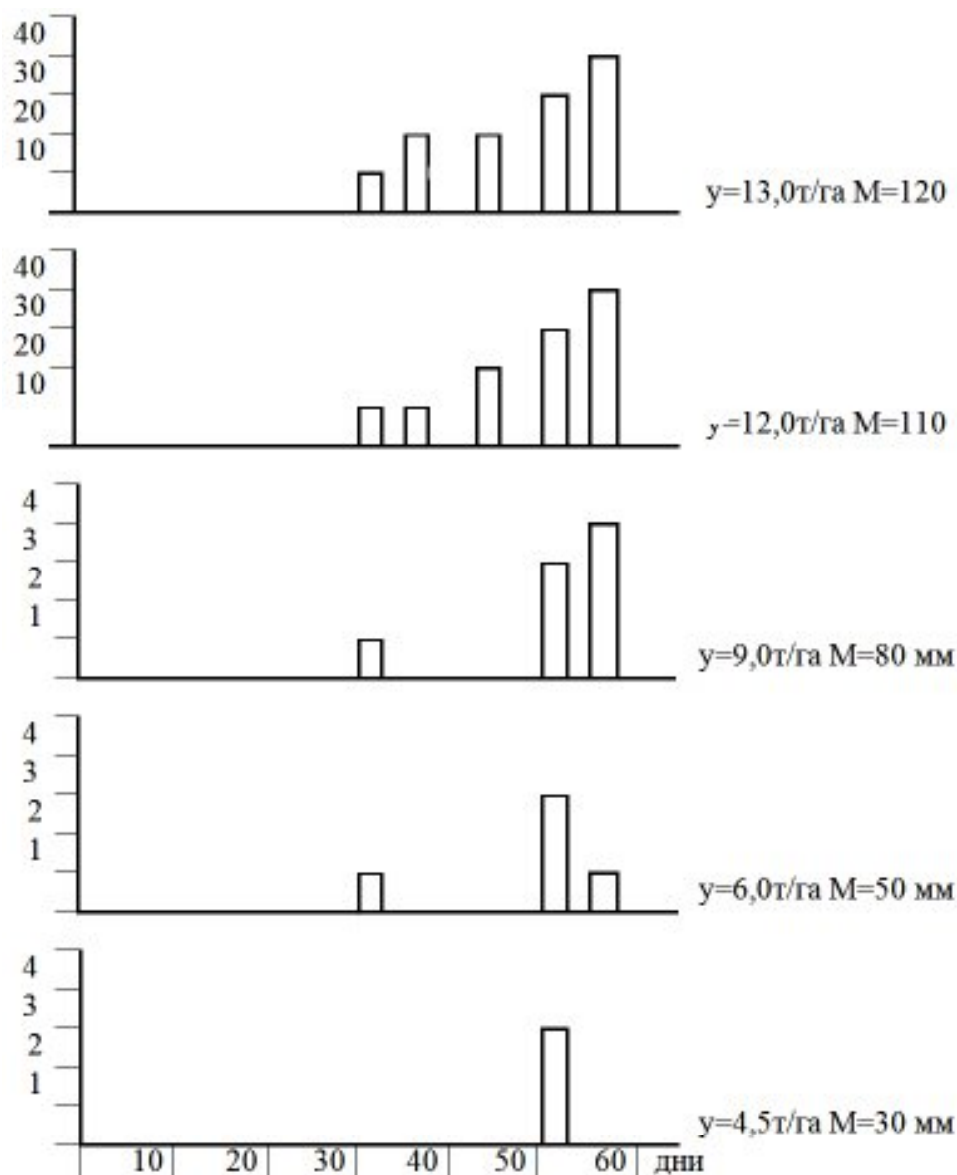


Рис. 2. Оптимизация поливного режима овощного гороха на программируемый уровень урожайности стручков

Заключение

Из полученных данных следует, что растения овощного гороха наиболее чувствительны к недостатку влаги в почве в период образования репродуктивных органов. Именно в этом периоде (50-57 день от появления всходов) поливы обеспечивают наибольшую прибавку урожая, повышая тем самым и эффективность ранее проведенных. Результаты таких экспериментов имеют важное практическое значение. Они позволяют не только оптимизировать водный режим поливов на определенный уровень урожая, но и более рационально

распределить оросительную норму в течение вегетации культуры, что весьма важно при недостатке поливных агрегатов. Таким образом, программирование урожаев по изложенной схеме позволяет, помимо определения реально достижимых показателей продуктивности посевов, выявить природные и организационные резервы, которые могут способствовать повышению эффективности производства.

Литература

1. *Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е. и др.* Моделирование продуктивности агроэкосистем. - Л.: Гидрометеиздат, 1982, 264 с.
2. *Ботнарь В.Ф.*, Планирование урожая овощных культур. Кишинэу, - 2000, 40 стр.
3. *Галямин Е.П.* Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. -Л.: Гидрометеиздат, 1981, 272 с.
4. *Жуковский Е.Е., Сени Ю.В., Тооминг Х.Г.* О вероятностной концепции расчета и прогноза эталонных урожаев. //Вест.с.-х. науки - 1989 -№5 - с.68-79.
5. *Полуэктов Р.А.* Динамические модели агроэкосистемы. -Л.: Гидрометеиздат, 1991, 312 с.
6. *Полевой А.Н.* Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. -Л.: Гидрометеиздат, 1983, 176 с.
7. *Сиротенко О.Д.* Математическое моделирование водно-теплового режима продуктивности агроэкосистем. -Л.: Гидрометеиздат, 1981, 167 с.
8. *Сиротенко О.Д., Абашина Е.В.* Прикладная динамическая модель формирования урожая для имитационных систем агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства. //Сб. Математическое моделирование в агрометеорологии. -Л.: Гидрометеиздат, 1986.
9. *Тооминг Х.Г.* Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. -Л.: Гидрометеиздат, 1984, 264 с.