

УДК 635.64:631.811

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ ТОМАТОВ В ФАКТОРИАЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Б. А. ЯГОДИН, И. А. ПАПОНОВ

(Кафедра агрономической и биологической химии)

Приводятся данные о роли азота, калия и кальция в формировании урожайности томата при периодическом питании и оптимизации состава питательного раствора в течение ночного периода. Периодическое исключение из питательного раствора азота и кальция в ночное время оказывало отрицательное влияние на продуктивность растений. При уменьшении концентрации калия в питательном растворе с 10 до 2 ммоль урожайность томата возрастала в связи с отсутствием отрицательных взаимодействий кальция и калия, а также азота, кальция и калия, при этом уменьшалось поражение плодов вершинной гнилью.

При выращивании овощных культур в условиях защищенного грунта важную роль играет рациональная система применения удобрений, что особенно актуально в связи с развитием метода гидропоники. В настоящее время при использовании гидропонного метода используется свыше 500 различных водных растворов, различающихся по концентрации и соотношению элементов питания [2]. Имеются сведения о целесообразности периодического питания растений — чередования питательного раствора и воды в течение суток [1, 3, 7—9]. При перемещении растений из питательного раствора с высокой концентрацией на дистиллированную воду определенная часть ионов высвобождается из кажущегося свободного пространства (КСП), поэтому правильнее говорить о чередовании высокой и низкой концентраций — соответственно II и I механизмы поглощения. Авторы отмечают, что при периодическом исключении питательных элементов из питательной среды (контроль — постоянное выращивание растений на питательном растворе) урожайность возрастала, при этом

усиливалась реутилизация ассимилятов в генеративные органы, увеличивалось поглощение минеральных элементов, которые более рационально распределялись в растении, особенно высокорее утилизируемые элементы — азот, фосфор и калий.

Цель данной работы заключалась в оценке влияния периодического питания на рост томата и оптимизации питания в ночное время с учетом данных полного факторного эксперимента.

### Методика

Вегетационный опыт проводили на Агрохимической станции им. Д. Н. Прянишникова Тимирязевской академии. Семена томата гибрида Русич ТmC<sub>3</sub>, предварительно протравленные ТМТД из расчета 3 мг на 1 г, проращивали в растворе 0,5 ммоль CaSO<sub>4</sub> в чашках Петри. Температура прорастания 26 °С. На 4-й день проростки томата пересаживали в бумажные рулоны, помещенные в 1/5 раствора Арнона — Хогланда. Полный состав этого раствора (в ммольях): Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> — 3,

Схема эксперимента

Минеральная соль	Концентрация солей, ммоль								
	NCaK	фон	N	Ca	NCa	K	NK	CaK	Mg
Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3	—	—	—	3	—	—	—	—
KNO <sub>3</sub>	8	—	—	—	—	—	10	—	—
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2	—	2	—	2	—	2	—	—
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	—	2	—	2	—	—	—	—
CaSO <sub>4</sub>	—	—	—	3	—	—	—	3	—
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	—	—	—	—	—	4	—	4	—
MgSO <sub>4</sub>	2	2	2	2	2	2	2	2	—
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Микроэлементы	+	+	+	+	+	+	+	+	+

MgSO<sub>4</sub> — 2, KNO<sub>3</sub> — 8, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> — 2, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> — 2 [13]. Микроэлементы были добавлены с учетом состава питательной смеси Хогланда [6]. На 16-й день после прорастания семян растения помещали в вегетационные сосуды емкостью 4 л на полный питательный раствор Арнона — Хогланда.

Периодическую смену растворов проводили с 38-го дня от начала прорастания семян (фаза бутонизации): с 8 до 20 ч растения находились на полном питательном растворе Арнона-Хогланда, в ночное время их переносили на растворы, из которых минеральные элементы были полностью исключены согласно схеме опыта (табл. 1). Верхний уровень содержания всех элементов соответствовал концентрации питательного раствора Арнона — Хогланда (II механизм погло-

щения), нижний для содержания азота и кальция — I механизму поглощения, а для калия он составлял 2 ммолья.

Через день измеряли pH питательного раствора и доводили этот показатель до оптимального значения (5,5) путем добавления в раствор NaOH или H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Через 6 дней полностью проводили смену питательных растворов.

По окончании эксперимента учитывали массу товарной продукции, надземной части, в том числе отдельно листьев и корней.

Математическая задача планирования эксперимента заключалась в необходимости получения некоторого представления о поверхности отклика факторов, которое в общем случае можно аналитически изобразить в виде функции

Таблица 2

Изменение биомассы растений (г) при периодическом питании

Вариант опыта	Листья	Корни	Стебли	Плоды	В т. ч. здоровые плоды	Отношение массы плодов к массе листьев
1	347	137	182	1088	983	3,1
2	284	148	165	833	691	3,0
НСР <sub>05</sub>	26	48	22	98	196	0,6
НСР <sub>01</sub>	48	88	40	181	360	1,2

$$Y=f(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

где  $Y$  — выход процесса, т. е. параметр, подлежащий изучению и оптимизации (масса плодов, листьев и т. д.);  $f$  — функция отклика;  $x_1, x_2, x_3$  — известные и изучаемые факторы — содержание соответственно азота, кальция и калия. В дальнейшем для удобства анализа уравнений регрессии эти факторы обозначим:  $x_N$ ;  $x_{Ca}$ ;  $x_K$ , а их взаимодействия —  $x_{NCa}$ ;  $x_{NK}$ ;  $x_{CaK}$  и  $x_{NCaK}$ .

Необходимо найти приближенную зависимость урожайности томатов от периодического питания азотом, кальцием и калием. Для определения действия и взаимодействия азота, кальция и калия спланирован и заложен полный факторный эксперимент по схеме  $2^3$ . Каждый из 3 исследуемых факторов варьирует на 2 уровнях, при этом реализуются возможные комбинации данных уровней.

На основании результатов полного факторного эксперимента можно определить 8 коэффициентов в уравнении регрессии

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3+b_{123}x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Коэффициенты такой модели оценивают по методу наименьших квадратов, но при анализе планов  $2^3$  для расчета коэффициентов регрессии удобно применять формализованную схему, известную как метод Йетса, или алгоритм быстрого преобразования Уолша. При анализе результатов исследований рассчитывали коэффициенты регрессии, оценивали их статистическую значимость и проверяли адекватность уравнений экспериментальным данным [4]. Данные также обрабатывали с использованием критерия Даункана [5].

## Результаты

При периодической замене питательного раствора дистиллирован-

ной водой наблюдалось снижение биомассы растений. Наиболее значительно уменьшалась масса листьев (табл. 2). Площадь листовой поверхности у растений, периодически помещаемых в дистиллированную воду, уменьшалась на 30-й день опыта. В то же время по отношению массы плодов к массе листьев, по массе корней и стеблей растения не различались.

Уменьшение фотосинтетической поверхности листьев, по-видимому, явилось решающим фактором в снижении урожайности, так как отношение массы плодов к массе листьев между вариантами значительно не различалось. При периодическом питании также возрастала доля плодов, поврежденных вершинной гнилью.

Расхождение результатов проведенного эксперимента с литературными данными [1, 7—9] следует рассматривать с учетом возможности и степени обогащения дистиллированной воды минеральными элементами при перенесении в нее растений из питательного раствора. Можно выделить 3 составляющие этого процесса: питательный раствор, остающийся на поверхности корневой системы; ионы, находящиеся в кажущемся свободном пространстве (КСП), и отток ионов через плазмалемму корневой системы.

Объем КСП [6] составляет 20 %. Но учитывая вклад ионов, находящихся на поверхности корневой системы (сопоставимый с количеством ионов в КСП), примем условный объем КСП за 50 %. В этом случае с каждым граммом корневой системы будет переноситься следующее количество элементов:

$$m=C \cdot V/100, \quad (3)$$

где  $m$  — мг·экв ионов в 1 г сырого вещества корней;  $C$  — концентрация в растворе Арнона — Хогланда, мг·экв/л;  $V$  — объем кажущегося свободного пространства, %.

Принимая массу корневой системы за 100 г (табл. 2) и учитывая объем сосуда с дистиллированной водой, равный 3 л, рассчитывали концентрацию элементов как результат перенесения растений с питательного раствора на дистиллированную воду (табл. 3).

Расчетная и фактическая концентрации элементов после 3-кратного переноса растений с питательного раствора на дистиллированную воду сопоставимы между собой (табл. 3).

Сопоставление концентраций элементов в дистиллированной воде после 3-кратного перенесения в нее растений с полного питательного раствора и минимальных концентраций, необходимых для нормального роста растений, показывает (табл. 3), что при отсутствии полной смены растворов в дистиллированной воде накапливается достаточное количество элементов питания.

Приведенные расчеты и данные фактического определения концентраций ионов в дистиллированной воде после 3-кратного переноса в нее растений с питательного раствора свидетельствуют о необходимости иной интерпретации выводов, сделанных рядом исследователей [1, 7—9], так как смену питательных растворов авторы проводили не ранее чем через 10 дней. При этом в дистиллированной воде могло на-

капливаться достаточное для нормального роста растений количество элементов. С тех же позиций могут быть рассмотрены противоречивые данные С. Ф. Реутовой [9], согласно которым периодическая смена растворов для рассады томатов приводит к снижению ассимиляционной поверхности листьев, в то время как более взрослые растения положительно реагируют на эти условия. Очевидно, что у рассады корневая система относительно слабо развита и количество ионов, переносимых периодически с растениями в дистиллированную воду, недостаточно для создания концентрации, благоприятствующей их росту. Взрослые растения с хорошо развитой корневой системой способствуют быстрому обогащению дистиллированной воды элементами питания (табл. 3).

В многофактором эксперименте для массы плодов получено следующее регрессионное уравнение:

$$Y = 994 + 127x_N + 81x_{Ca} - 60x_{CaK} - 80x_{N CaK}; t_{05} \cdot S[b] = 42. \quad (4)$$

Его решение дает возможность найти сочетание уровней факторов, при котором выход продукции будет максимальным.

Согласно уравнению [4], уменьшение концентрации калия при сохранении концентрации азота и кальция в питательном растворе приведет к повышению продуктивности томата. Отметим, что именно

Таблица 3

Расчетная и фактическая концентрации элементов (мкмоль/л) при перенесении корневой системы томата с питательного раствора Арнона — Хогланда в дистиллированную воду

Элемент	Расчетная, создаваемая КСП при перенесении корней в дистиллированную воду	Фактическая на 3-й день чередования растворов	Минимальная, достаточная для нормального роста [15, 16, 18, 19]
N (NO <sub>3</sub> )	266	100—700	700—1000
K	166	400—900	100
P (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	33	20—40	1—2,5
Ca	50	100—200	100

в этом варианте урожайность была выше, чем в контроле (табл. 4). Следовательно, для нормального роста растений необходимо постоянное присутствие в растворе азота и кальция; взаимодействие кальция и калия, а также азота, кальция и калия в течение ночного периода отрицательно сказывается на урожайности.

Уравнение, аналогичное уравнению (4), получим для массы здоровых плодов (плоды, пораженные вершинной гнилью, не учитывались).

$$Y = 962 + 121x_N + 94x_{Ca} - 76x_{CaK} - 111x_{NCaK}; t_{05} \cdot S[b] = 49. \quad (5)$$

Сопоставление уравнений (4) и (5) позволяет судить о тенденции к уменьшению проявления вершинной гнили при наличии кальция в растворе в ночные часы (увеличение коэффициента  $x_{Ca}$  от 81 к 94) и снижении концентрации калия за счет возростания отрицательных коэффициентов  $x_{CaK}$  с 60 до 76 и  $x_{NCaK}$  с 80 до 111.

Отрицательное влияние периодического азотного питания на рост растений, по-видимому, связано с активностью нитратредуктазы (НР). Фермент НР индуцируется нитратами [10, 14]. В интактных растениях два источника нитратов

могут регулировать активность НР: пул нитратов, хранящихся в листьях, — 99 %  $NO_3$  обнаружено в вакуолях [17], и пул, поступающий в листья из корней. В литературе отмечается [12], что активность НР увеличивается при наличии нитратов в окружающем растворе и уменьшается сразу после исключения их из раствора, хотя общий уровень нитратов в побегах не изменяется. Прерывание снабжения корней нитратами приводит к снижению как активности НР, так и интенсивности ростовых процессов, несмотря на высокое содержание первых в надземной части, поскольку доступность пула нитратов, находящегося в вакуолях, для НР затруднена [11].

Уменьшение продуктивности растений в результате периодического исключения кальция из раствора, по-видимому, связано с необходимостью постоянного присутствия этого элемента в питательном растворе для стабилизации работы мембран. При изучении влияния периодического питания кальцием на рост растений необходимо учитывать видовую специфичность растений, так как потребность в нем однодольных и двудольных сильно различается [15, 16].

Общая биомасса растений зависе-

Таблица 4  
Рост томата (масса в г) при периодическом питании N, Ca, K и Mg

Вариант питания	Плоды	В т. ч. здоровые	Стебли	Листья	Корни	Отношение массы плодов к массе листьев
Фон	873cd	851cd	156b	305	150	2,92
N	873cd	808cd	153b	287	142	3,21
Ca	938bcd	938bc	145b	294	113	3,21
NCa	1373a	1373a	223a	377	185	3,53
K	756d	662d	185ab	354	222	2,17
NK	1148ab	1148ab	170b	319	173	3,62
CaK	902bcd	902cd	159b	294	139	3,03
NCaK	1088abc	983bc	182ab	347	137	3,13
Mg	798d	773cd	160b	282	144	2,95

ла от взаимодействия азота и кальция.

$$Y = 1635 + 151x_N + 69x_{Ca} + 86x_{N_{Ca}} - 85x_{CaK} - 89x_{N_{CaK}}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 59. \quad (6)$$

Максимальная масса растений получена при уменьшении концентрации калия. Взаимодействие азота и кальция положительно сказалось главным образом на росте вегетативной массы, что подтверждается регрессионным уравнением

$$Y = 651 + 55x_{N_{Ca}} - 29x_{N_{K}} - 39x_{CaK}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 28. \quad (7)$$

Увеличению массы стебля, кроме того, способствовало наличие азота в ночное время:

$$Y = 172 + 10x_N + 15x_{N_{Ca}} - 8x_{N_{K}} - 9x_{CaK}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 7. \quad (8)$$

Масса корней зависела от присутствия в питательном растворе кальция и калия, а также от взаимодействия азота и кальция, азота и калия, кальция и калия:

$$Y = 158 - 14x_{Ca} + 16x_{N_{Ca}} + 26x_{K} - 14x_{N_{K}} - 16x_{CaK}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 11. \quad (9)$$

Наибольшее влияние на развитие корневой системы оказало наличие в растворе калия. Максимальная масса корней была в варианте, где азот и калий отсутствовали, а содержание калия не уменьшалось.

Общее регрессионное уравнение для массы листьев

$$Y = 322 + 24x_{N_{Ca}}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 15. \quad (10)$$

Чтобы проследить, как влияет периодическое питание элементов на массу листьев по ярусам растения, проводился их дифференцированный учет: до 1-го соцветия (нижние листья), от 1-го до 3-го (средние) и выше 3-го соцветия (верхние листья). В этих случаях урав-

нения имели следующий вид: для массы нижних листьев

$$Y = 96 - 6x_{N_{K}} - 8x_{CaK}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 6, \quad (11)$$

средних —

$$Y = 122 + 12x_{N_{Ca}}; \\ t_{05} \cdot S [b] = 9, \quad (12)$$

верхних —

$$Y = 104 + 13x_N; \\ t_{05} \cdot S [b] = 10. \quad (13)$$

Необходимо отметить отрицательное влияние на массу нижних листьев взаимодействия азота и калия, кальция и калия, а также положительное действие азота на рост верхних листьев.

Об эффективности использования ассимилятов судили по отношению массы плодов к массе листьев. На основании этого показателя было получено уравнение

$$Y = 1,54 + 0,12x_N; \\ t_{05} \cdot S [b] = 0,11. \quad (14)$$

Следовательно, непрерывная обеспеченность азотом способствовала увеличению не только биомассы растений, но и реутилизации ассимилятов в плоды. Данную зависимость подтверждает регрессионное уравнение [14]. На основании этого можно косвенно судить об интенсивности фотосинтеза

$$Y = 3,1 + 0,27x_N; \\ t_{05} \cdot S [b] = 0,24. \quad (15)$$

Самые высокие значения отношения масс плодов к листьям отмечены при отсутствии кальция в питательном растворе в ночное время и в варианте с уменьшенной концентрацией калия. Значимых различий по продуктивности между вариантом с отсутствием магния в растворе и вариантом с исключением азота, кальция и калия не установлено.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин Н. С. Вопросы системы питания растений.— Тр. зонального Ин-та зернового хозяйства районов Нечерноземной полосы.— М.: Изд-во АН СССР, 1941, вып. 1, с. 129.— 2. Брызгалов В. А., Советкина В. Е., Савинова Н. И. Овощеводство защищенного грунта.— Л.: Колос. Ленингр. отд., 1983.— 3. Ковалева Е. П. Сущность действия периодического питания растений.— Бюл. ВИУА, 1984, № 64, с. 11—13.— 4. Лисенков А. Н. Математические методы планирования многофакторных медико-биологических экспериментов.— М.: Медицина, 1979.— 5. Литтл Т., Хиллз Ф. Сельскохозяйственное опытное дело. Планирование и анализ.— М.: Колос, 1981.— 6. Люттге У., Хигинботам Н. Передвижение веществ в растениях.— М.: Колос, 1984.— 7. Мошков Б. С. Выращивание растений при искусственном освещении.— М.: Колос, 1966.— 8. Пономарева С. М. Влияние периодического питания на продуктивность сельскохозяйственных растений.— Автореф. канд. дис. М., 1979.— 9. Реутова С. Ф. Влияние уровня и режимов минераль-

ного питания на урожай и качество томатов и огурца в условиях гидропоники.— Автореф. канд. дис. М., 1983.— 10. Beevers L., Hageman R. H.— *Annu. Rev. Plant. Physiol.*, 1969, vol. 20, p. 495—522.— 11. Blom-Zandstra G., Lampe J. E. M.— *J. Plant Nutr.*, 1983, vol. 6, p. 611—628.— 12. Heimer Y., Filner P.— *Biochim. et Biophys. acta*, 1971, vol. 230, N 2, p. 362—372.— 13. Hewitt E. J.— *Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition*. 2nd edn. Commonwealth Agriculture Bureaux, Farnham Royal, England (1966).— 14. Kaplan D., Roth-Bejerano N., Lips H.— *Eur. J. Biochem.*, 1974, vol. 49, N 2, p. 393—398.— 15. Loneragan J. F., Snowball K.— *Aust. J. Agric. Res.*, 1969, vol. 20, N 3, p. 465—478.— 16. Loneragan J. F., Snowball K., Simmons W. J.— *Aust. J. Agric. Res.*, 1968, vol. 19, N 6, p. 845—857.— 17. Martinoia E., Heck V., Wiemken A.— *Nature*, 1981, vol. 289, N 5795, p. 292—293.— 18. Massey D., Winsor G. W.— *Acta Horticulture*, 1980, N 98, p. 127—133.— 19. Pettersson S.— *Physiologia Plantarum.*, 1975, vol. 34, N 4, p. 281—285.

Статья поступила 14 июня 1991 г.

## SUMMARY

The data about the role of nitrogen, potassium and calcium which they play in formation of tomato yield under conditions of periodic nutrition and optimal composition of nutrient solution at night are presented. Excluding nitrogen and calcium from nutrient solution from time to time at night produced undesirable effect on plant productivity. With lower potassium concentration in nutrient solution (from 10 to 2 mmol) the yield of tomato increased, as there were no undesirable interactions between calcium and potassium, as well as between nitrogen, calcium and potassium, the affect by blossom end rot in fruit decreasing.