

УДК 631.811:631.589.2:635.64

**УСЛОВИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ И АЭРАЦИИ КОРНЕЙ
ТОМАТА В СТАТИЧНОЙ И ПРОТОЧНОЙ ВОДНОЙ КУЛЬТУРЕ**

С. Ф. РЕУТОВА, Г. И. ТАРАКАНОВ, Б. А. ЯГОДИН, П. А. АПОСТОЛ

**(Кафедра овощеводства и кафедра агрономической
и биологической химии)**

Овощные культуры защищенного грунта, в частности томат, очень требовательны к обеспечению корней кислородом и элементами минерального питания. В статье приводятся данные о выращивании томата методом статичной и проточной культуры при различных режимах и уровнях минерального питания.

Большой производственный успех, достигнутый при выращивании тепличных томатов методом тонкослойной проточной культуры [12], обусловлен прежде всего благоприятным для корневой системы растений режимом аэрации. Метод аэропоники был известен еще в начале XX века, но широкого распространения он не получил из-за высокой требовательности к оборудованию даже с точки зрения современного производства.

Многими исследователями [2, 15, 19, 20, 21, 25] убедительно доказана возможность получения высокого урожая в том случае, когда корни растений постоянно омываются движущимся по растительным питательным раствором. Требования к растительным, установленным под определенным углом, и оборудованию самые простые, поскольку отсутствует необходимость создания высокого давления для периоди-

ческого образования аэрозолей в зоне корней, как в аэропонике. При данном методе выращивания корни растений удовлетворительно обеспечены кислородом [20, 22, 23].

Наряду с этим продолжаются многочисленные исследования, в которых применяется метод водной культуры растений без постоянного принудительного движения питательного раствора в зоне корней. Экспериментально подтверждено отсутствие сколько-нибудь значительного передвижения кислорода через сосуды из надземной части растений к корням, а также существенного снижения концентрации кислорода в зоне корней в течение 20 мин после продувания раствора воздухом [4].

Представляют интерес результаты опытов [16, 17], проведенных в целях изучения складывающихся газовых режимов в статичной водной культуре без принудительной аэрации, с постоянным продуванием воздуха через питательный раствор и в аэропонике. Вследствие неблагоприятного газового режима в зоне корней в статичной водной культуре урожайность томатов значительно снижается.

В методических указаниях по водной культуре растений отмечается необходимость проведения аэрации питательного раствора в сосудах периодическим продуванием его 4 раза в сутки по 3 ч [7], по 5—10 мин [18], или конкретные данные о периодичности продувания отсутствуют [8]. В целом признается, что вопрос аэрации питательного раствора в водной культуре недостаточно разработан, а при использовании существующих рекомендаций ограничивается реализация потенциальной продуктивности водной культуры, поэтому они могут быть учтены лишь в том случае, когда получение высокой урожайности не является целью исследований.

Такие овощные культуры защищенного грунта, как томат, огурец, перец, по сравнению с культурами открытого грунта отличаются усиленным ростом и большей урожайностью, отсюда повышенные требования к обеспечению корней кислородом и элементами минерального питания. Особое значение приобретают указанные факторы при водной культуре, так как содержание кислорода в питательном растворе в силу известных законов не превышает $2,5 \cdot 10^{-4}$ М. В то же время концентрацию отдельных минеральных элементов, например азота, без вреда для растений можно изменить в очень больших пределах ($5 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^{-2}$ М). В связи с этим данные о содержании элементов минерального питания в растворе могут быть использованы для объяснения поведения растений в зависимости от концентрации кислорода.

Нами изучалось влияние различных режимов и уровней минерального питания в статичной и проточной водной культуре на формирование урожая томатов.

Методика

Для статичной водной культуры использовали пластмассовые сосуды высотой 28 см и диаметром 18 см. для проточной — лотки длиной 3 и 6 м и шириной у основания 15 см. Лотки устанавливали с уклоном 1:50. В опытах 1980—1981 гг. питательная смесь в сосудах продувалась воздухом каждые 2 ч по 30 мин, в опыте 1983 г. частоту подачи воздуха увеличили в 2 раза. Распылителем воздуха служила установленная на дно сосуда пористая аквариальная насадка. Расход питательного раствора для проточной культуры в зависимости от длины лотка составлял 0,25 и 0,50 л/мин, объем раствора — 12,5 л/м². В сосуды и питательные емкости ежедневно утром и вечером добавляли воду, возмещая потери влаги на транспирацию. Через день определяли рН и, добавляя H₂SO₄ или HNO₃, поддерживали рН на уровне 5,5—6,5. Опыты ставили в теплице

и вегетационном домике. В качестве объектов исследования использовали томаты сорта Белый налив 241, F₁ Ревермун и F₁ Карлсон. Повторность опытов 4-кратная. В вегетационном домике каждая повторность включала по одному растению, в теплице — по 10. Густота стояния растений — 2,5 на 1 м². В весенне-летней культуре в 1980 г. применяли питательную смесь Кнопфа, а в последующие годы — Журбицкого (табл. 1 и 2). Использование последней предусматривает усиление питания определенным макроэлементом в процессе онтогенеза растений. В теплице томаты обеспечивались элементами минерального питания по программе, рассчитанной на получение урожая 10 кг/м² к 1 июля при посеве семян 25 декабря.

Микроэлементы добавляли в питательный раствор в количествах, рекомендуемых в ра-

Состав питательной смеси Журбицкого (мг/л)

Вид соли	Смесь					
	I	II	III	IV	V	VI
KNO ₃	283	425	303	404	445	545
NH ₄ H ₂ PO ₄	46	69	73	97	184	126
Ca(NO ₃) ₂	230	345	508	674	392	000
CaSO ₄	136	204	41	54	346	824
MgSO ₄	96	114	140	186	198	247

Примечание. Смесь подбирали согласно следующим фазам роста и развития растений: I — до бутонизации; II — распускание 50 % цветков на первой кисти; III — цветение следующих кистей; IV — до налива плодов на трех кистях; V — созревание на первой — третьей кистях; VI — для предотвращения чрезмерного вегетативного роса (устанавливается визуально на любой стадии онтогенеза растений).

боте [7]. Смену раствора проводили 9 раз за вегетацию. В опыте 1980 г. раствор не меняли и не корректировали содержание в нем элементов минерального питания в течение вегетационного периода. В опытах, которые проводили в теплице, также не было смены питательного раствора. Сроки проведения агротехнических приемов указаны в табл. 3. Температурные условия естественные, за исключением опыта в теплице в 1983 г. Культуру вели в один стебель, на каждом растении оставляли 4 кисти, F₁ Карлсон — 10 кистей. Кроме того, применяли разные нормы минеральных элементов.

Опыт 1 (1980 г.) — статичная водная культура в сосудах: 1 — корневая система находилась в питательном растворе постоянно, норма минерального питания 1(NPK); 2 — корневая система находилась 1 сут в питательном растворе, 1 сут в воде, 1(NPK); 3 — то же, что в варианте 1, 2(NPK); 4 — то же, что в варианте 2, 2(NPK); 5 — то же, что в варианте 1, 4(NPK); 6 — то же, что в варианте 2, 4(NPK).

Опыт 2 (1981—1982 гг.) — статичная водная культура в сосудах: 1 — корневая

система находилась постоянно в питательном растворе, 1 (NPK); 2 — то же, 2(NPK).

Опыт 3 (1982 г.) — проточная водная культура в лотках: 1 — корневая система омывалась питательным раствором постоянно, 1 (NPK); 2 — корневая система омывалась 1 сут питательным раствором, 1 сут водой, 1 (NPK); 3 — корневая система омывалась питательным раствором днем, водой — ночью, 1 (NPK); 4 — то же, что и в варианте 1, 2(NPK); 5 — то же, что и в варианте 2, 2(NPK); 6 — то же, что и в варианте 3, 2(NPK).

Опыт 4 (1983 г.) — статичная водная культура в сосудах и проточная в лотках. Норма минерального питания 1(NPK): 1 — корневая система в лотках омывалась питательным раствором постоянно; 2 — корневая система в лотках омывалась 1 сут питательным раствором, 1 сут водой; 3 — корневая система в лотках омывалась днем питательным раствором, ночью — водой 4 — то же, что и в варианте 1, только в сосудах; 5 — то же, что и в варианте 2, только в сосудах; 6 — то же, что и в варианте 3, только в сосудах.

Результаты

При периодической смене питательного раствора и воды, а также в условиях статичной водной культуры урожайность томатов на повышенном фоне удобрения существенно повысилась (табл. 4). Абсолютный вынос элементов минерального питания за вегетацию (табл. 5) возрастал по мере увеличения дозы удобрений, а относительный был больше на фоне 1(NPK). Если принимать во внимание, что в среднем потребление растениями минеральных элементов на 1 кг плодов близко к биологическому их выносу (табл. 6), а урожайность плодов в 30—38 раз выше (табл. 7), чем в обсуждаемом опыте (табл. 4) при 1(NPK), то, казалось бы, потенциально эта доза должна обеспечивать значительно большую про-

Таблица 2
Концентрация элементов (мМ)
в питательных смесях

Номер смеси	Продолжительность периода, дней	N	P	K	Ca	Mg
Смесь Журбицкого						
I	14	6,0	1,2	2,8	2,4	1,6
II	7	9,0	1,8	4,2	4,7	3,2
III	11	10,0	2,1	3,0	3,4	2,3
IV	17	13,0	2,8	4,0	4,5	3,0
V	11	10,8	4,8	3,3	5,0	3,3
VI	—	6,5	3,3	5,4	6,1	4,2
Смесь Кюпа						
		8,4	3,2	3,4	3,5	4,2

дуктивность томатов. На самом деле доза удобрений в вариантах 1 и 2 (опыт 1) столь низка, что на начальном этапе большая часть ее используется на формирование вегетативной массы, а в период формирования и налива плодов будет ощущаться недостаток элементов питания. Следовательно, пользоваться данными о биологическом выносе элементов минерального питания на 1 кг плодов для практических целей можно лишь в том случае, если они получены в расчете на максимально возможную урожайность.

Поскольку водообеспечение растений в условиях опыта можно считать гарантированным, остается полагать, что фактор аэрации корней наряду с минеральным питанием играют немаловажную роль в формировании урожая томатов. Как показал математический анализ данных, представленных в табл. 4, урожайность томата в основном зависит от уровня минерального питания. Однако более благоприятные условия аэрации и уменьшение вредного воздействия продуктов метаболизма корней в вариантах с периодическим исключением питательного раствора и использованием двойного объема воды, а также лучшее использование элементов минерального питания на этом фоне обусловили большую урожайность. По данным химического анализа состава питательного раствора в различных точках сосуда в течение вегетации растений, в воде кислорода содержится больше ($5,0 \pm 2,1$ мг/л), чем в питательном растворе ($3,2 \pm 3,1$ мг/л). Недостаточная аэрация корней в статичной водной культуре из-за вышедшего из строя компрессора в 1982 г. привела к преждевременному окончанию опыта (19 июля) и получению невысокого урожая томатов (табл. 7).

Расчеты, проведенные на основании результатов разных опытов (табл. 8), убедительно показывают важность постоянной принудительной аэрации корней в статичной водной культуре. Как известно, поток

Таблица 3

Сроки проведения отдельных агротехнических приемов

Год исследования	Посев семян	Пикировка сеянцев	Посадка рассады	Уборка урожая
1980	19/III	29/IV	29/V	1/IX
1981	30/III	10/IV	23/V	25/VIII
1982 — 1983	18/IV	29/IV	25/V	2 5/VIII
1983 (теплица)	25/XII	7/1	20/II	31/VI

Таблица 4

Урожайность томатов в статичной культуре (конец вегетации) при различных уровнях и режимах минерального питания. Опыт 1 (1980 г.)

Вариант опыта	Масса, г на растение				Соотношение сухой массы	
	плодов (сырых)	сухая			вегетативных органов и корней	надземной части и корней
		плоды	листья и стебли	корни		
Белый налив 241						
1	115	7,5	7,5	2,7	2,8	5,5
2	140	8,9	8,2	3,2	2,6	5,3
3	220	14,4	22,1	4,5	4,9	8,1
4	400	23,7	19,6	4,3	4,6	10,1
5	650	34,1	25,1	4,0	6,3	14,8
6	970	55,1	34,2	4,9	7,0	18,2
НСР ₀₅	22		3,1	0,7		
F ₁ Ревермун						
1	90	6,1	12,0	1,8	6,7	10,0
2	100	8,3	13,5	2,5	5,4	8,7
3	205	12,0	31,3	6,2	5,1	7,0
4	195	14,3	28,0	6,1	4,6	6,9
5	465	26,4	49,4	5,5	9,0	13,8
6	740	41,1	51,2	7,5	6,8	12,3
НСР ₀₅	25		4,1	1,0		

Использование минеральных элементов томатами за вегетацию
(числитель — % к внесенному количеству, знаменатель — г на 1 кг плодов).
Опыт 1 (1980 г.)

Вариант опыта	N		P		Ca		Mg	
	внесено, мг/сосуд	использовано	внесено, мг/сосуд	использовано	внесено, мг/сосуд	использовано	внесено, мг/сосуд	использовано
Белый налив 241								
1	845	$\frac{56}{4,12}$	285	$\frac{80}{1,97}$	1220	$\frac{20}{2,16}$	250	$\frac{5}{0,11}$
2	854	$\frac{72}{4,39}$	285	$\frac{79}{1,61}$	1220	$\frac{21}{1,79}$	250	$\frac{6}{0,11}$
3	1708	$\frac{59}{4,60}$	571	$\frac{55}{1,43}$	2440	$\frac{20}{2,19}$	500	$\frac{6}{0,13}$
4	1708	$\frac{66}{2,82}$	571	$\frac{62}{0,89}$	2440	$\frac{24}{1,44}$	500	$\frac{6}{0,07}$
5	3416	$\frac{40}{2,60}$	1142	$\frac{46}{0,81}$	4880	$\frac{18}{1,31}$	1000	$\frac{4}{0,06}$
6	3416	$\frac{65}{2,28}$	1142	$\frac{65}{0,76}$	4880	$\frac{22}{1,09}$	1000	$\frac{5}{0,05}$
F ₁ Ревермун								
1	854	$\frac{80}{7,62}$	285	$\frac{93}{2,97}$	1220	$\frac{24}{3,27}$	250	$\frac{9}{0,26}$
2	854	$\frac{97}{8,35}$	285	$\frac{92}{2,62}$	1220	$\frac{26}{3,20}$	250	$\frac{10}{0,26}$
3	1708	$\frac{86}{6,77}$	571	$\frac{94}{2,62}$	2440	$\frac{38}{4,47}$	500	$\frac{10}{0,25}$
4	1708	$\frac{64}{5,56}$	571	$\frac{78}{2,29}$	2440	$\frac{28}{3,52}$	500	$\frac{9}{0,23}$
5	3416	$\frac{44}{3,24}$	1142	$\frac{57}{1,40}$	4880	$\frac{22}{2,34}$	1000	$\frac{7}{0,15}$
6	3416	$\frac{64}{2,96}$	1142	$\frac{66}{1,01}$	4880	$\frac{23}{1,53}$	1000	$\frac{9}{0,12}$

частиц в растворе в зависимости от движущей силы описывается первым законом Фика $F = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$; где D — коэффициент диффузии, см²/с;

$\frac{\Delta c}{\Delta x}$ — градиент концентрации. Коэффициенты диффузии малых ионов и молекул, к которым относятся основные ионы элементов минерального питания, кислород и углекислый газ, равны $\sim 10^{-5}$ см²/с. Согласно уравнению $X_e^2 = 4Dt$ [10], где X_e — расстояние, на котором концентрация уменьшается на $1/e$ от ее значения в начальный момент (e — основание натурального логарифма); t — время, необходимое для диффузии; последний показатель увеличивается пропорционально квадрату расстояния, которое нужно пройти. Следовательно, расстояние, равное 1 см, указанные выше ионы и молекулы пройдут приблизительно за 10^5 с (1,2 сут) при температуре 25°.

Рассмотрим потребность томатов в элементах минерального питания и кислороде и сравним ее с возможностью, допускаемой теорией, и с условиями, складывающимися в наших опытах.

Максимальный прирост надземной массы у F₁ Карлсон составляет около 11 г воздушно-сухого вещества в сутки (табл. 8); он приходится на 16—30 мая и совпадает с максимальным суточным потреблением минеральных элементов, в том числе азота (— 140 мг на 1 ра-

Таблица 6

Биологический вынос минеральных элементов урожаем томатов
 F₁ Ревермун в проточной культуре
 (числитель — г на растение, знаменатель — г на 1 кг плодов).
 Опыт 3 (1982 г.)

Вариант опыта	N	P	K	Ca	Mg
1	6,3	1,8	7,1	4,5	0,8
	2,32	0,66	2,6	1,65	0,29
2	6,8	1,9	7,5	4,6	0,9
	2,32	0,65	2,65	1,57	0,31
3	6,9	2,0	7,6	5,0	0,9
	2,29	0,66	2,52	1,66	0,30
4	9,3	2,7	10,7	5,8	1,0
	2,84	0,82	3,26	1,77	0,30
5	9,5	2,9	10,9	5,7	1,0
	2,68	0,82	3,07	1,61	0,28
6	9,4	2,9	11,0	6,0	1,0
	2,70	0,83	3,16	1,72	0,29

стение в сутки). Так как поглощение минеральных элементов является активным процессом, на который затрачивается энергия, получаемая при дыхании, то с большей вероятностью можно допустить, что за этот же период корнями растений поглощается наибольшее количество кислорода. Известно [9], что на образование 100 г сухого вещества массы растений корнями при дыхании выделяется 2,26 моля углекислого газа. Коэффициент дыхания можно принять равным единице, что реально при достаточном снабжении кислородом в начальный момент помещения корней в питательный раствор или воду. В это время имеются все условия для аэробного дыхания, поскольку концентрация кислорода в граничащем с корневой поверхностью слое воды максимально возможная, а дыхательным субстратом служат в основном углеводы, поступающие из листьев. Следовательно, для образования 11 г сухого вещества за сутки корни одного растения томата потребляют около 4—8 г кислорода. Эти расчеты согласуются с выводами других авторов [6], которые считают, что среднесуточное потребление кислорода корнями растений в среднем составляет 1 мг на 1 г сырой надземной массы. Для F₁ Карлсон этот показатель в среднем был равен 0,5 мг на 1 г сырой надземной массы. Только одни изолированные корни в час потребляют 0,6 мл кислорода на 1 г сырой массы [1, 14]. Исходя из этого, при температуре 20—25° 150 г сырой массы корней потреб-

Таблица 7

Структура биомассы томатов F₁
 Ревермун (г на растение) в зависимости
 от условий аэрации и режима
 минерального питания

Вариант опыта	Сырая масса плодов, г/растение	Сухая масса		Отношение сырой массы плодов к вегетативной массе
		+ стебли листья	корни	
Опыт 2 (1981 г.)				
1	1535	93	8	2,4
2	2185	113	11	3,0
HCP ₀₅	138			
Опыт 2 (1982 г.)				
1	312	40	4	1,1
2	416	59	5	1,0
HCP ₀₅	34			
Опыт 3 (1982 г.)				
1	2720	107	14	2,6
2	2925	108	15	2,8
3	3015	108	14	2,8
4	3280	136	18	2,5
5	3545	137	20	2,5
6	3485	137	20	2,6
HCP ₀₅	212			
Опыт 4 (1983 г.)				
1	2350	92	14	2,1
2	2465	79	16	2,6
3	2585	87	20	2,5
4	585	32	3	2,7
5	1080	52	5	3,1
6	1020	44	4	3,4
HCP ₀₅	168			

Накопление воздушно-сухой массы (г) томатами Карлсон
за период вегетации в 1983 г. (в расчете на одно растение)

Дата взятия пробы	Объем корней, см ³	Корни	Стебли	Листья	Плоды	Соотношение вегетативной массы к массе корней
1-й культуурооборот						
28/1	—	—	0,1	0,1	—	6,7
14/II	8	0,4	0,5	1,5	—	4,7
2/III	13	1,0	1,2	4,0	—	5,2
17/III	75	4,0	6,5	16,7	5	7,0
1/IV	130	7,3	15,0	35,0	25	10,3
16/IV	140	10,0	28,0	48,0	60	13,6
1/V	150	10,0	36,6	58,3	114	19,5
16/V	180	11,6	50,6	98,0	193	29,7
30/V	200	18,0	90,0	120,0	300	20,6
16/VI	215	18,0	110,0	126,0	336	21,4
30/VI	230	18,0	110,0	125,0	370	15,8
2-й культуурооборот						
1/VII	10	0,5	2	2	—	8,0
21/VII	60	6,5	20	20	—	7,1
3/VIII	150	15,0	35	99	5	6,3
23/VIII	150	15,2	60	70	48	11,7
1/IX	190	15,8	90	90	149	19,0
10/IX	200	16,0	70	85	119	17,1
23/IX	230	13,4	70	78	170	19,8
3/X	135	10,8	65	75	150	21,6
12/X	110	10,2	63	68	336	19,5
22/X	130	10,5	51	66	357	16,4
1/XI	120	11,0	52	53	364	11,4

ляют около 6,2 г кислорода в сутки. Молодые корни риса в сутки потребляют 44,4, а пшеницы — 67,9 см³/г [5]. Если допустить, что потребность корней томатов в кислороде приблизительно такая же, то в нашем опыте она составит 8—13 г кислорода на растение в сутки в период максимального роста корней. Такое допущение возможно, поскольку известно, что корни томатов отзывчивее на улучшение условий аэрации, чем корни пшеницы [11].

С 16 по 30 мая при среднем радиусе 0,03 см длина корней томатов составила $5 \cdot 10^4$ см, а площадь поглощающей поверхности 10^4 см². Следовательно, потоки для азота и кислорода у корневой поверхности равны 10^{-11} и $3 \cdot 10^{-10}$ моль/см²·с. Исходя из уравнения для потока, приведенного ранее, для поддержания F постоянным ΔC при $\Delta x = 10$ см должна быть не менее 10^{-6} М для азота и 10^{-4} М для кислорода. В опытах концентрация азота в сосудах колебалась между 10^{-3} — $3,4 \cdot 10^{-2}$ М, а кислорода в разных точках при температуре раствора 20—25° 10^{-8} — $2 \cdot 10^{-4}$ М. Меньший показатель характерен для кислорода в конце периода без продувания раствора. Проба взята из корневой массы на глубине 10 см.

Из уравнения для потока $F = \bar{L} C_e$ [9] поглотительная способность корня \bar{L} может быть определена как отношение среднего потока \bar{F} к концентрации питательного раствора C_e . Тогда \bar{L} составляет 10^{-8} — 10^{-9} см/с для азота и $3 \cdot 10^{-4}$ — $3 \cdot 10^{-6}$ см/с для кислорода. Соответствующие коэффициенты потребности корня $(a\bar{L})$ равны 10^{-10} — 10^{-11} и 10^{-5} — 10^{-7} см²/с (a — средний радиус корня). Следовательно, значение $a\bar{L}/D_b$ будет очень мало для азота и больше 1 для кислорода. Поправочный коэффициент b характеризует изменение свободной диффузии при данной температуре и зависит от различных факторов. В частности, следует ожидать уменьшение D на поверхности корня за счет увеличения вязкости воды.

Содержание сухого вещества в вегетативных органах
в течение вегетации растений в 1980 г. (г на растение). Опыт 1 (1980 г.)

Вариант опыта	Белый валив			F Ревермун		
	надземные органы	корни	надземные органы:корни	надземные органы	корни	надземные органы:корни
Интенсивный рост (20/VI)						
1	1,5	0,5	3,0	3,0	0,7	4,3
2	1,8	0,5	3,6	3,0	0,6	5,0
3	2,4	0,6	4,0	3,2	0,8	4,0
4	2,3	0,6	3,8	3,1	0,9	3,4
5	3,2	0,6	5,3	4,2	0,8	5,3
6	2,5	0,7	3,6	4,5	0,9	5,0
Начало цветения (1/VII)						
1	4,6	1,1	4,2	7,1	1,6	4,4
2	4,9	1,5	3,3	6,5	1,7	3,8
3	8,1	1,4	5,8	11,0	1,7	6,5
4	7,4	1,3	5,7	7,3	2,0	3,7
5	8,8	1,4	6,3	9,0	1,8	5,0
6	9,0	1,8	5,0	10,4	2,1	5,0

Согласно полученным результатам и теоретическим доказательствам [9], диффузия во многом определяет скорость поглощения кислорода и не оказывает значительного влияния на поглощение азота из витательных смесей в условиях статичной водной культуры. Другими словами, при высоком потреблении кислорода вокруг корней в статичной водной культуре очень скоро создается зона истощения, препятствующая поступлению его к поверхности корней в достаточном количестве. Об этом свидетельствуют результаты прямого точечного измерения концентрации кислорода в корнях и в близомывающем их слое питательного раствора. В течение 20 мин после продувания раствора воздухом концентрация кислорода в гуще корневой массы снижалась до нуля [4]. При недостаточной аэрации элементы минерального питания благодаря высоким концентрациям поступали в растения в основном пассивно. И хотя их содержание в биомассе достаточно, для того чтобы обеспечить больший ее прирост, этого не происходит из-за низкой активности дыхания корней, которая, в свою очередь, препятствует включению в процесс метаболизма имеющихся элементов минерального питания. Поэтому продуктивность биомассы растений при одинаковых уровнях минерального питания, но лучших условиях аэрации корней более высокая (табл. 9).

Таким образом, газовый режим, складывающийся в водной статичной культуре без постоянного перемешивания питательного раствора, не может обеспечить включение в процесс метаболизма корней элементов минерального питания. Ограничивающим фактором для жизнедеятельности корней растений являются низкие концентрации кислорода и коэффициент диффузии последнего. Часть кислорода поступает в растение с потоком воды, но она незначительна, поскольку взрослое растение тепличного томата может транспирировать около 2 л воды в сутки, с которой поступает не более 12—14 мг кислорода. Следует подчеркнуть, что расчеты сделаны для усредненных значений и в зависимости от возраста и конкретного участка корня, времени суток и других факторов возможны существенные колебания. К тому же конкуренцию корням при поглощении кислорода составляют микроорганизмы, которые перехватывают его в количестве не менее чем 10—15 % к потребности корней [24].

Что же касается элементов минерального питания, в частности азота, то высокая концентрация последнего в питательном растворе не ограничивает его поступление даже при отсутствии аэрации.

Напряженность в обеспечении растений кислородом увеличивается еще из-за местного накопления большого количества углекислого газа, выделяемого при дыхании. Вследствие неподвижности раствора вблизи корней, низкого коэффициента диффузии резко изменяется соотношение $O_2:CO_2$, что приводит к ингибированию дыхания [13, 16, 17]. Только постоянным продуванием корневой массы воздухом можно поддерживать наиболее благоприятное соотношение $O_2:CO_2$, так как углекислый газ при этом практически полностью удаляется из раствора.

Конвективный перенос раствора или воды в пластмассовых емкостях в дневное время отсутствовал, а ночью он имел место, поскольку охлажденная на поверхности вода опускалась на дно сосуда. Интенсивность работы корней наиболее высокая днем [20], поэтому не приходится рассчитывать на улучшение аэрации корней за счет указанного выше фактора по крайней мере в период, когда температура воздуха и раствора повышается или она постоянна. Немаловажное значение имеет и существенное увеличение за период вегетации соотношения между надземной массой растений и массой корней (табл. 5, 8 и 9). Следовательно, в то время, когда потребность надземной части растений в питательных веществах резко возрастает, корневая система удовлетворяет ее не за счет увеличения емкостных показателей, а за счет усиления жизнедеятельности и увеличения поглотительной способности. Для этого необходимо, чтобы условия аэрации поддерживались на необходимом уровне. В водной культуре растения обеспечены кислородом благодаря проточности или постоянному продуванию воздуха через питательный раствор.

Исследования показали [20], что в проточной культуре даже при значительном расходе питательного раствора (6 л/мин на лоток при $j = 14-24$ м) корням не хватает кислорода, поскольку в растительной массе большого объема. В этом случае предпочтительнее следует отдавать постоянную принудительную аэрацию корней, гарантирующей обеспечение их водой и элементами минерального питания. Такой режим имеет преимущества перед аэропоникией. В последнем случае положительно решаются вопросы аэрации, а минеральное питание и водообеспеченность растений в силу периодической подачи и быстрого слива с поверхности корней питательного раствора требуют своего решения. В связи с этим необходимо приложить дополнительные усилия, в том числе и технические, для оптимизации условий корнеобитаемой среды и обеспечения надежности выращивания растений в аэропонике.

Выводы

1. Периодическое исключение (12—24 ч) минеральных элементов из питательного раствора при их концентрации 14—90 мМ/л не приводит к уменьшению продуктивности томатов по сравнению с таковой при постоянном минеральном питании в водной культуре.

2. Низкая концентрация кислорода ($10^{-5}-2 \cdot 10^{-4}$ М) в статичной водной культуре (без постоянной принудительной вентиляции) обуславливает существенное снижение урожайности томатов по сравнению с их урожайностью в проточной водной культуре.

3. Напряженность в обеспеченности растений кислородом возрастает при росте в процессе вегетации соотношения между надземной массой и корнями (от 3 до 30).

4. Улучшение аэрации корневой системы за счет движения питательного раствора (0,5 л/мин на 10 растений) или более частого его продувания (30 мин/ч) в сочетании с оптимальным режимом минерального питания обеспечивает существенное повышение урожайности томатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева В. Я., Николаев Б. А., Гордон Л. Х. и др. Действие валиномицина на К-проницаемость и потребление кислорода в зависимости от физиологического состояния корней пшеницы. — Физиология растений, 1984, т. 31, вып. 4, с. 692. — 2. А п о с т о л П. А., Р е у т о в а С. Ф. Минеральное питание томата на проточной гидропонике. — Плодоовощное хозяйство, 1985, № 6, с. 23—25. — 3. А р ц и н х о в с к и й В. М. О воздушной культуре растений. — Журн. опытной агрономии. 1911, т. 12, с. 46—53. — 4. В а р д а п е т я н Б. Б., Д а в т я н Н. Г. Кислородный режим корней тыквы в водных культурах. — Агрехимия, 1970, № 5, с. 93—96. — 5. Г р о д з и н с к и й А. М., Г р о д з и н с к и й Д. М. Краткий справочник по физиологии растений. — Киев: Наукова думка, 1973. — 6. Д о я р е н к о А. Г. Факторы жизни растений. — М.: Колос, 1966. — 7. Ж у р б и ц к и й З. И. Теория и практика вегетационного метода. — М.: Наука, 1968. — 8. К л е й н Р. М., К л е й н Д. Т. Методы исследований растений. — М.: Колос, 1974. — 9. Н а й П. Х., Т и н к е р П. Б. Движение растворов в системе почва — растения. — М.: Колос, 1980. — 10. Н о б е л П. Физиология растительной клетки. — М.: Мир, 1973. — 11. Р у б и н Б. А. Курс физиологии растений. — М.: Высшая школа, 1971. — 12. С е м и т ч и е в Х. Тепличное овощеводство на малообъемной гидропонике. — М.: Агропромиздат, 1985. — 13. С л е й ч е р Р. Водный режим растений. — М.: Мир, 1970. — 14. С а ф и н о - О с т а т е в с к а я Г. Ф., Г о р д о н Л. Х. Действие фунгицида на дыхательный газообмен корней пшеницы. — Физиология растений, 1984, т. 31, вып. 5, с. 896. — 15. С и г е о Н. Патент № 1149856, 1985, Бюл. № 13 % — 16. Ш т р а у с б е р г Д. В., Р а к и т и н а Л. Н. Об аэрации и газовом режиме корней в аэропонике и водной культуре. — Агрехимия, 1970, № 4, с. 101. — 17. Ш т р а у с б е р г Д. В. О некоторых изменениях строения корней томатов в связи с условиями аэрации. — Физиология растений, 1973, т. 20, вып. 3, с. 569. — 18. Ю д и н Ф. А. Методика агрохимических исследований. — М.: Колос, 1980. — 19. С о о p e r A. The ABC of NFT Grower Books. London, 1979. — 20. D r e w s M., F r a n k R. Archiv Fur Gartenbau, 1985, Bd. 33, H. 2, S. 49. — 21. D a v i d F. G. Genic. rural, 1983, N 11, p. 79—83. — 22. G i s l e r o d H., K e m p t o n R. Sci. Hortic., 1983, vol. 20, N 1, p. 23—33. — 23. I a c k s o n M. B. J. hortic. Sci, 1984, vol. 59, N 3, p. 439—448. — 24. N e a l e s T. E., D a v i e s I. A. Australien J. of Biolog. Sci., 1966, vol. 19, p. 471—480. — 25. V i n s o r G. W., H u r d R. G., P r i c e D. Nutrient Film Techique, Growers Bui, N 5, Glasshouse Crops Reseach. Institute, 1979. Lettchampton, West Sussex.

Статья поступила 25 декабря 1986 г.

SUMMARY

The data on the effect of static and running cultures under different regimes and levels of mineral nutrition on tomato yield in the greenhouse are discussed.

Elimination of mineral elements from the nutrient solution for some time (12—24h), their concentration being 14—90 ml/l, does not result in lower tomato yield compared with that under regular mineral nutrition in static water culture (without continuous forced air supply).

Low oxygen concentration (10^{-5} — $2 \cdot 10^{-4}$ M) in static water culture results in essentially lower tomato yield as compared with that in running water culture.

Better aeration of the root system due to transferring the nutrient solution (0.5 l/min per 10 plants) or its more frequent blowing through (30 min/h) in combination with the optimum mineral nutrition regime provides essentially higher yield of tomatoes.