

УДК 635.63'64:631.84:631.95

ПИТАНИЕ ОГУРЦА И ТОМАТА ВОССТАНОВЛЕННЫМ АЗОТОМ В ЗАМКНУТОЙ ГИДРОПОННОЙ И РЫБОВОДНОЙ СИСТЕМАХ

П. А. АПОСТОЛ, Т. А. КАРЕПИНА, В. К. ШИЛЬНИКОВА

(Кафедра микробиологии)

Томаты и огурцы выращивали гидропонным способом в теплице, а также в замкнутой системе рыба — растение, где источником восстановленного азота для растений служили мочевины и продукты метаболизма рыб. Существенные различия в продуктивности растений получены в зависимости от условий аэрации питательного раствора корневой среды. Постоянная искусственная аэрация обеспечивает высокую продуктивность растений. Смоделирована система регулирования содержания аммонийного азота в питательном растворе.

С точки зрения физиологии и агрохимии аммонийный азот эквивалентен нитратному [8]. Однако, несмотря на доказанную вредность излишних количеств нитратов для человека и животных, технологи отдают предпочтение этой форме [11], так как существует возможность отравления растений аммиаком, особенно если их выращивают на минеральных субстратах или в питательном растворе. Для тепличного овощеводства, где урожайность, а следовательно, и вынос элементов минерального питания в 8—10 раз выше, чем в поле, существенно выше и требования к более рациональному использованию азотсодержащих удобрений [5, 14, 16] и ведется поиск систем минерального питания, позволяющих в максимальной степени включать нитратный азот в безвредные для человека и окружающей среды органические соединения [18, 19], решаются вопросы дробного внесения азотсодержащих удобрений [5, 14, 16] и перехода на медленнодействующие ис-

точники [9], применяются и ингибиторы нитрификации [15].

В тепличном растениеводстве регулирование факторов выращивания растений с высокой степенью точности позволяет управлять минеральным питанием. Управление осуществляется вручную или при помощи систем автоматизации.

Решающее влияние на уровень и качество урожая овощей в теплицах оказывает взаимосвязанность таких факторов азотного питания, как формы [20], сроки внесения и концентрации азота в корневой среде. В соответствии с известным рецептом [4] следует регулярно анализировать и корректировать элементный состав корневой среды. Оптимальная концентрация азота в этом случае составляет 10—15 ммоль/л, а восстановленный азот NH_4^+ , $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ в исходном растворе не должен превышать одной трети общего [7].

Экологически чистые способы выращивания тепличных растений наиболее перспективны. Основное

их преимущество заключается в полной утилизации живыми организмами внесенных в систему биогенных элементов, в частности азота.

В данной работе ставилась задача — показать возможность получения высоких урожаев плодов огурцов и томатов при обеспечении их амидным или аммонийным азотом из различных источников без слива питательного раствора в дренаж в период вегетации растений. Для этого была разработана программа минерального питания растений и проведены опыты по выяснению характера влияния восстановленного азота при разных режимах аэрации корней в водных культурах и при культивировании в замкнутой системе рыба — растение.

Методика

Исследования проводили в зимней теплице Овощной опытной станции Тимирязевской академии.

Опыт 1. Внесение мочевины и разных режим аэрации корней в водной культуре огурцов и томатов (1985 г.).

Схема опыта включала четыре варианта: 1 — контроль — постоянная естественная аэрация питательного раствора за счет диффузии воздуха через границу раздела атмосферы с поверхностью питательного раствора; 2 — естественная аэрация (0,5 ч) чередуется с принудительной (1,5 ч); 3 — естественная аэрация (3 ч) чередуется с принудительной (3 ч); 4 — постоянная принудительная аэрация [13] барботажем. Принудительную аэрацию проводили при помощи аквариумного компрессора с четырьмя выходами на растителью. Мощность компрессора 50 Вт. Давление воздуха $7 \cdot 10^3$ Па. Растения выращивали в емкостях-растильнях с объемом

питательного раствора 50 л (в каждой емкости 10 растений из расчета 3,5 на 1 м²). Изучали рост и развитие гибридов томатов F₁ Карлсон, огурцов F₁ — Московский тепличный и Нацу Фусинари. Растения формировали в один стебель, учет биомассы проводили в конце вегетации, урожая плодов — по мере созревания для каждого растения отдельно.

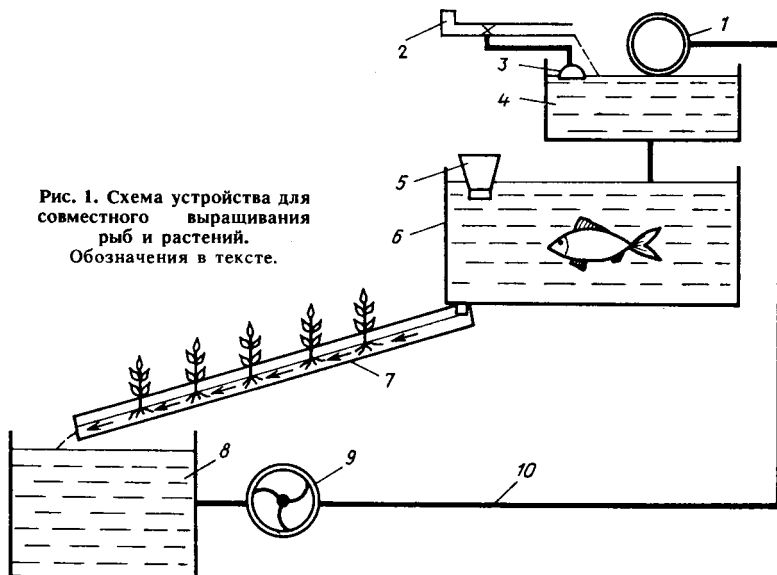
В качестве источников минерального питания использовали CO(NH₂)₂, Ca(H₂PO₄)₂, K₂SO₄, MgCO₃, CaCO₃. Микроэлементы, кроме железа, вносили в питательный раствор 1 раз в 2 нед по рецепту Бентли [1] для культур, требующих рН ниже 6,5. Железо применяли в виде хелата с таким же интервалом в дозе 2 мг/л.

Макроэлементы вносили по программе, составленной с учетом ожидаемого урожая и уровня солнечной радиации.

Программа минерального питания растений. По средним многолетним данным, для зоны Москвы за период с 1 июня до 1 октября количество поступающей в поле солнечной энергии составляет не менее 1500 мДж/м². За этот же период в теплице, где проводился опыт, возможно получение более 12 кг плодов томата с 1 м². Летом в дневные часы температура воздуха в теплице достигала 35—40 °С (при внешней температуре 25—28 °С). Перегрев воздуха происходил вследствие недостаточной вентиляции и отсутствия затенения. Пол теплицы бетонированный.

Расчитанную по биологическому выносу норму азота для получения 12 кг плодов с 1 м² (36 г) применяли в течение периода вегетации дифференцированно. Было принято, что в первый месяц вегетации (до фазы бутонизации) азот вносится в корневую среду в зависимости от поступившей солнечной энергии (N_γ,

Рис. 1. Схема устройства для совместного выращивания рыб и растений. Обозначения в тексте.



$\text{г}/\text{м}^2$), согласно уравнению $N(\gamma) = N_0 e^{\gamma}$, где N_0 — количество азота, $\text{г}/\text{м}^2$; e — основание натурального логарифма; r — удельный темп внесения азота, $\text{г} \cdot \text{м}^2/\text{г} \cdot \text{МДж}$; γ — количество солнечной радиации, поступившей на поверхность земли в поле, $\text{МДж}/\text{м}^2$.

В нашем опыте $N_0 = 0,01 \text{ г}/\text{м}^2$, $r = 0,008 \text{ (г} \cdot \text{м}^2/\text{г} \cdot \text{МДж)}$ для сеянцев в фазе 1-го листа.

Оставшееся количество запланированного азота вносили равномерно по $0,02 \text{ г}/\text{МДж}$. Корректировку питательного раствора проводили каждый раз, когда расчетная доза азота достигала $20 \text{ мг}/\text{л}$, а электропроводность была ниже $2,5 \text{ мСм}$. Внесение питательных веществ в раствор прекращали за 2 нед до снятия опыта.

Объем раствора в емкости довели водопроводной водой до исходной отметки 1 раз в сутки. В дренаж

питательный раствор в течение вегетации не сливали.

С целью нейтрализации подкисляющего действия на питательный раствор солей аммония была усилена карбонатная буферная емкость системы. Для этого после обнаружения чрезмерного подкисления питательного раствора в емкость вносили по 50 г CaCO_3 и MgCO_3 .

Мочевину, однозамещенный фосфат кальция и сернокислый калий применяли в течение вегетации в соотношении $\text{N:P:K } 1:0,25:1,8$.

Опыт 2 (1984—1985 гг.). Совместное выращивание карпа (*Cyprinus carpio*), томатов (*Lycopersicon esculentum*) и огурцов (*Cucumis sativus* L.).

Устройство для проведения эксперимента представлено на рис. 1.

Гидродинамический процесс поддерживали постоянным поступлении

ем в напорный бак 4 питательного раствора, нагнетаемого с помощью насоса 9. Водопроводная вода попала в систему по водопроводу 2 через поплавковый клапан 3, питательный раствор — через оксигенатор 1; из напорного бака он самоотеком поступал в рыбоводный бассейн 6, далее в лотки (желобы) для выращивания растений 7, из них в бак-отстойник 8. Бессточную систему замыкал насос 9, действующий постоянно.

Рыб кормили в зависимости от создававшихся условий (по поедаемости корма) специализированным гранулированным кормом при помощи автокормушки «Рефлекс» 5, установленной над рыбоводным бассейном.

Контроль — аналогичная гидропонная установка, в которой корневое питание растений осуществляли за счет следующих минеральных солей: NH_4NO_3 , K_2SO_4 , MgSO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; микроэлементы применяли таким же образом, как в опыте 1. Питательный раствор корректировали по результатам агрохимического анализа, если концентрация макроэлементов снижалась больше, чем наполовину от исходной составляющей: N — 200 мг/л, P — 63, K — 320, Ca — 200, Mg — 50 мг/л. Содержание кальция и микроэлементов в период вегетации не нормировали. При исходном внесении питательных веществ, кроме NH_4NO_3 , использовали $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

Растения выращивали в желобах с шириной основания 0,15 и длиной 6 м; уклон 1:25. Расстояние между их центрами — 0,7 м. Полезная площадь установки, занятая растениями, 30 м². В желобы помещали полосы из минеральной ваты (6×0,10×0,05 м). Рассадку томатов в межфазный период бутонизация — цветение и огурцов в фазу 5-го листа

высаживали 16 февраля в лотки на эти полосы вместе с торфяным рассадным кубиком. Окончание опыта в 1984 г. 1 ноября, в 1985 г. — 15 июля.

Следует отметить, что до 4 июля 1984 г. в системе рыба — овощи добавлено 3 кг K_2SO_4 . Разовая доза составляла 50—200 г K_2SO_4 в зависимости от pH раствора. Один раз (17 марта) растения обрабатывали микроэлементами через листья.

Объем питательного раствора в системе 2000 л.

Продуктивность растений в зависимости от условий выращивания

Огуречные растения меньше реагировали на испытанные в опытах режимы аэрации и минерального питания, чем томаты (табл. 1 и 2). Урожайность огурцов (табл. 1) в контрольном варианте не отличалась от урожайности варианта с постоянной принудительной аэрацией (вариант 4) и была существенно ниже в вариантах с периодической сменой видов аэрации (варианты 2 и 3).

Томаты во всех вариантах не проявляли признаков устойчивого увядания. При значительно более длительном периоде вегетации, чем у огурца, продуктивность томата в вариантах с ухудшенной аэрацией (1, 2 и 3) была значительно ниже, чем в варианте с постоянной проводкой (табл. 1 и 2).

Режим аэрации непосредственно влияет на количество образующейся биомассы корней, а также на их функциональную деятельность. Так, в опыте с томатами варианты с принудительной аэрацией (2, 3 и 4) характеризуются двойным увеличением массы корней по сравнению с контролем. При этом практически одна и та же масса в зависимости

Таблица 1

Урожайность плодов в зависимости от условий аэрации корней

Вариант	Томаты			Огурцы			
	F ₁ Карлсон			F ₁ Московский тепличный		Нацу Фусинари	
	кг/раст	кг/м ²	в. г. *, шт/раст	кг/раст	кг/м ²	кг/раст	кг/м ²
1	0,3	1,0	4	2,5	9,0	1,7	6,0
2	2,2	7,8	1	0,6	3,4	0,7	2,5
3	3,0	10,7	1	1,0	3,5	0,4	1,6
4	4,2	14,8	1,5	2,9	10,6	1,6	5,9
НСР ₀₅	0,4	1,7	0,5	0,5	2,2	0,3	1,3

* Плоды с вершинной гнилью (в. г.).

Таблица 2

Структура биомассы (воздушно-сухой) в конце вегетации
(числитель — г/раст, знаменатель — %)

Вариант	Томаты					Огурцы (Московский тепличный)				
	растение	лист	стебель	корни	плоды	растение	лист	стебель	корни	плоды
1	73,12	23,5	22,0	4,9	22,7	145,3	30,5	17,1	8,2	89,5
	100	32,1	30,1	6,7	31,1	100	21,0	11,8	5,6	61,6
2	283,4	70,2	64,3	10,4	138,5	53,7	16,6	8,1	5,4	23,6
	100	24,8	22,6	3,7	48,9	100	30,8	15,1	10,1	44,0
3	325,0	61,3	48,2	8,2	207,3	70,5	18,5	8,0	9,4	34,6
	100	18,9	14,8	2,5	63,8	100	26,3	11,3	13,3	49,1
4	497,5	82,4	52,0	8,8	354,3	166,9	34,7	12,5	10,2	109,5
	100	16,6	10,4	1,8	71,2	100	20,8	7,5	6,1	65,6

Таблица 3

Объем (V, см³) и масса корней (m, г) у томатов в зависимости от условий аэрации

Вариант	V, см ³		% корней в объеме питательного раствора	m, г		$\frac{m}{V} = \rho$
	на 1 м ²	на растение		на 1 м ²	на растение	
1	112	32	0,6	17,2	4,9	0,153
2	578	165	3,0	33,4	9,5	0,058
3	504	144	2,6	28,5	8,2	0,057
4	588	168	3,1	30,8	8,8	0,052
НСР ₀₅	175	50		6,7	1,9	

Продуктивность гидропонной системы рыба — овощи

Таблица 4

Вид продукции	Дата сбора урожая	Площадь, м ²	Продуктивность, кг/м ²		
			1984 г.		1985 г.
			опыт	контроль	опыт
Томаты	14/VII	24	5,4	9,1	7,3
	1/XI	24	18,0	24,2	—
Огурцы	14/VII	6	10,2	—	—
Рыба	14/VII	30	0,9*	—	—
	1/XI	30	1,5*	—	0,6

* Чистый прирост.

Таблица 5

Содержание минеральных элементов (% на сухую массу) в органах растений в конце вегетации. Опыт I

Вариант	Томаты				Огурцы			
	листья	стебли	корни	плоды	листья	стебли	корни	плоды
<i>Азот</i>								
1	2,95	1,60	3,81	1,75	3,43	2,95	4,50	4,07
2	2,68	1,65	4,43	2,32	3,45	4,63	4,54	4,52
3	2,98	1,67	3,67	2,09	2,58	3,96	4,52	4,49
4	2,84	1,64	3,42	2,08	3,21	4,34	4,20	4,00
<i>Фосфор</i>								
1	0,70	0,26	1,24	0,43	0,59	0,63	1,53	0,70
2	0,46	0,15	0,48	0,46	0,65	1,19	1,76	0,98
3	0,36	0,22	0,42	0,43	0,94	1,16	1,17	1,19
4	0,33	0,18	0,32	0,40	1,13	1,25	1,58	0,73
<i>Калий</i>								
1	6,13	2,95	3,59	3,04	3,54	3,54	4,87	4,97
2	4,43	1,44	1,34	3,18	5,17	5,19	4,54	4,82
3	5,58	1,42	1,42	3,27	5,76	5,39	3,37	4,71
4	5,75	2,93	3,38	3,19	6,03	5,72	4,95	4,71
<i>Магний</i>								
1	0,36	0,20	0,18	0,12	0,25	0,27	0,20	0,14
2	0,47	0,12	0,20	0,17	0,36	0,18	0,24	0,16
3	0,30	0,14	0,28	0,16	0,34	0,14	0,28	0,16
4	0,46	0,16	0,16	0,18	0,22	0,16	0,25	0,18
<i>Кальций</i>								
1	1,46	0,70	1,40	0,07	2,00	0,67	4,30	0,18
2	1,57	0,63	1,54	0,07	1,46	0,70	1,03	0,15
3	1,62	0,50	1,24	0,09	1,80	0,51	1,24	0,17
4	1,48	0,72	1,72	0,06	2,34	0,72	1,20	0,18

от режимов аэрации обеспечивает различный прирост наземной массы, в том числе плодов (варианты 3 и 4, табл. 2).

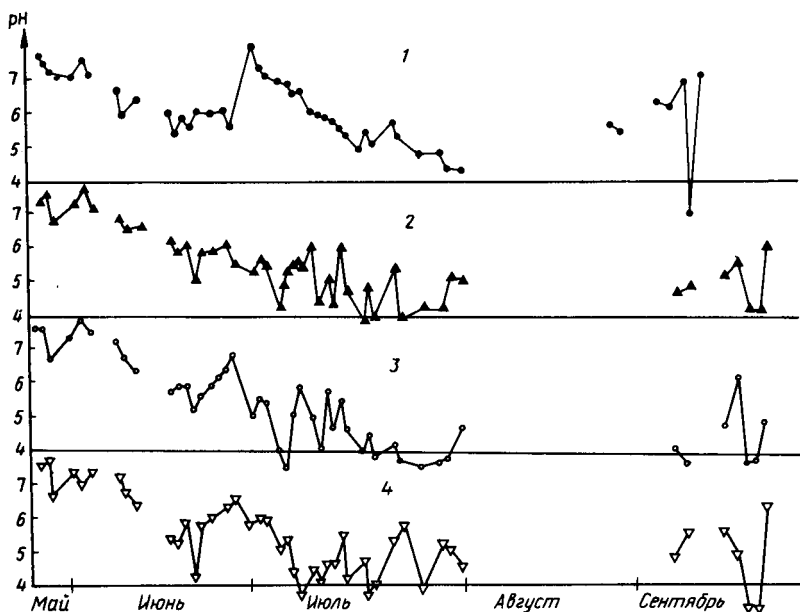
Иными словами, улучшение условий аэрации томатов увеличивает общий прирост биомассы надземных органов, сдвигает соотношение в сторону доли плодов и снижает долю корней в общей массе в 2—3 раза по сравнению с контролем. Следовательно, и функциональная деятельность корней в режиме постоянной аэрации при амидном питании существенно улучшается.

Для проектирования малообъемных гидропонных установок необходимо знать объем, занимаемый корнями растений. Поскольку на по-

следний приходится лишь 3 % от 5 л в расчете на одно растение (табл. 3), то очевидна возможность значительного уменьшения объемов гидропонных емкостей и конструкций. Наибольшая плотность корневой массы в вариантах без принудительной аэрации является результатом их отмирания и потери жизненной структуры.

В системе рыба — овощи (табл. 4) урожайность растений была ниже, чем в вариантах, где вносились минеральные удобрения, но в то же время здесь получена дополнительная белковая продукция в виде рыбы. Надо полагать, дальнейшее совершенствование таких систем целесообразно.

Рис. 2. Изменение pH питательного раствора корневой среды при выращивании томатов. Опыт 1.
1, 2, 3, 4 — варианты опыта.



Вынос растениями минеральных элементов (г/раст) в конце вегетации.
Опыт I

Вариант	Томаты				Огурцы (Московский тепличный)			
	листья	стебли	корни	плоды	листья	стебли	корни	плоды
<i>Азот</i>								
1	0,69	0,35	0,19	0,40	1,05	0,43	0,37	3,60
2	1,88	1,06	0,46	3,21	0,57	0,34	0,25	1,06
3	1,83	0,80	0,30	4,33	0,48	0,30	0,43	1,60
4	2,34	0,85	0,30	7,20	1,11	0,53	0,44	4,38
<i>Фосфор</i>								
1	0,16	0,06	0,06	0,10	0,18	0,09	0,13	0,64
2	0,44	0,10	0,05	0,64	0,11	0,09	0,10	0,23
3	0,39	0,10	0,03	0,89	0,17	0,09	0,11	0,30
4	0,35	0,09	0,03	1,42	0,37	0,15	0,20	0,80
<i>Калий</i>								
1	1,44	0,65	0,18	0,69	1,08	0,51	0,40	1,45
2	3,38	0,93	0,14	4,40	0,95	0,38	0,25	1,14
3	4,17	0,68	0,12	6,78	1,07	0,41	0,32	1,60
4	4,74	1,52	0,30	11,31	1,95	0,82	0,37	5,16
<i>Магний</i>								
1	0,08	0,04	0,01	0,03	0,06	0,05	0,02	0,13
2	0,33	0,08	0,02	0,23	0,06	0,01	0,01	0,04
3	0,18	0,07	0,02	0,33	0,06	0,01	0,03	0,06
4	0,38	0,08	0,01	0,64	0,08	0,02	0,03	0,20
<i>Кальций</i>								
1	0,34	0,15	0,69	0,02	0,61	0,11	0,11	0,16
2	1,10	0,40	0,16	0,09	0,24	0,06	0,06	0,04
3	1,00	0,24	0,10	0,19	0,33	0,04	0,12	0,06
4	1,22	0,37	0,15	0,21	0,81	0,09	0,12	0,20

Элементы минерального питания. Содержание минеральных элементов в органах растений существенно не различалось по вариантам (табл. 5). Вынос минеральных элементов (табл. 6) в основном определялся величиной биомассы растений (табл. 2).

Важным для любой системы выращивания растений является полнота поглощения ими внесенных минеральных элементов. В наших опытах достигнута высокая степень поглощения N, P и K (табл. 7, 8, 9). Положительный баланс мине-

ральных элементов объясняется ошибками при взятии средней пробы, проведении анализа, а также колебанием содержания элемента в удобрениях.

В практике часто для сравнительного анализа пользуются величиной биологического выноса [3, 6]. Результаты нашего опыта показали (табл. 6), что в вариантах с высокой продуктивностью растений уровень биологического выноса ниже приводимого в литературе [3].

Отмечено отсутствие накопления нитратного и аммонийного азота

Т а б л и ц а 7
Вынос минеральных элементов (г) на 1 кг
плодов

Ва-риант	Азот	Фос-фор	Калий	Маг-ний	Каль-ций
<i>Томаты</i>					
1	5,43	1,27	9,86	0,53	4,00
2	3,00	0,56	4,02	0,30	0,79
3	2,42	0,93	3,92	0,20	0,51
4	2,55	0,21	4,25	0,26	0,46
<i>Огурцы</i>					
1	2,18	0,42	2,58	0,10	0,39
2	3,70	0,88	4,53	0,20	0,67
3	2,81	0,67	3,40	0,16	0,55
4	2,22	0,52	2,86	0,11	0,42

в питательном растворе при высокой продуктивности растений (варианты 2, 3 и 4, табл. 10).

Там, где наблюдалось устойчивое накопление аммонийного азота, свыше 100 мг/л (табл. 10), со временем (1 августа) повышалась концентрация и нитратного азота до 20 мг/л. В этих же вариантах (2 и 3) 9 июля отмечалось увядание растений и появление некротических пятен на листьях, которое не пре-

кращалось до уборки. Содержание катионов в растворе было намного ниже (табл. 11), чем в известных смесях [4, 11]. После 17 июля удобрения под огурцы в вариантах 2 и 3 не вносили.

Высокая плотность корней вокруг места поступления воздуха в вариантах с постоянной принудительной аэрацией препятствовала работе азотатора, ограничивая радиус его действия в растительные четыремя точками. Видимо, поэтому 15 августа в этих вариантах и началось увядание растений огурца.

При низком уровне аэрации загроуженность основного стебля огурца плодами (общая масса не менее 1,5 кг на куст) привела к стрессовой ситуации с последующим увяданием и отмиранием корней у растений. Поэтому опыт был прекращен 19 августа.

В системе рыба — овощи нитритный и аммонийный азот вредны для рыб [12, 17]. Высокое накопление этих форм азота наблюдалось, если плохо подавался кислород, или в тех случаях, когда производили очистку емкостей от активного ила. Другие элементы в системе были об-

Т а б л и ц а 8
Баланс азота, фосфора и калия (г/раст) в конце вегетации в опыте 1

Вариант	Азот			Фосфор			Калий		
	внесено	вынос	% от внесенного	внесено	вынос	% от внесенного	внесено	вынос	% от внесенного
<i>Огурец F₁ Московский тепличный</i>									
1	4,8	5,5	115	1,0	1,0	100	7,3	6,4	88
2	2,7	2,2	81	0,5	0,5	100	3,9	2,7	69
3	2,7	2,8	104	0,5	0,7	104	3,9	3,4	87
4	6,5	6,5	100	1,3	1,5	115	9,7	8,3	86
<i>Томаты F₁ Карлсон</i>									
1	2,31	1,60	69	0,5	0,38	76	4,2	2,9	69
2	6,40	6,60	103	1,3	1,2	92	11,5	8,9	77
3	7,30	7,30	100	1,5	1,4	93	13,1	11,8	90
4	10,30	10,90	106	2,1	1,9	90	18,5	17,9	97

Таблица 9
Баланс кальция и магния удобрений (г/раст)
в конце вегетации в опыте I

Вариант	Кальций			Магний		
	вне-сено	вы-нос, г	% от внесенного	вне-сено	вы-нос	% от внесенного

Томаты F₁ Карлсон

1	2,5	1,2	48	0,8	0,2	25
2	2,5	1,8	72	0,8	0,7	88
3	2,5	1,5	60	0,8	0,6	75
4	2,5	2,0	80	0,8	1,1	138*

Огурец F₁ Московский тепличный

1	1,6	1,0	63	0,8	0,3	38
2	1,2	0,4	33	0,8	0,1	13
3	1,2	0,6	50	0,8	0,2	25
4	1,6	1,2	75	0,8	0,3	38

* Использована водопроводная вода с содержанием кальция — 50, магния — 8 мг/л.

Таблица 10
Содержание аммонийного азота
в питательном растворе перед очередным
внесением удобрений (мг/л) в опыте I

Вариант	I/VII	II/VII	17/VII	I/VIII	19/VIII
---------	-------	--------	--------	--------	---------

Огурцы F₁ Московский тепличный

1	1,7	80	104	50	—*
2	3,0	120	290	250	—*
3	2,4	130	236	220	—*
4	3,0	1,5	—*	—*	—*

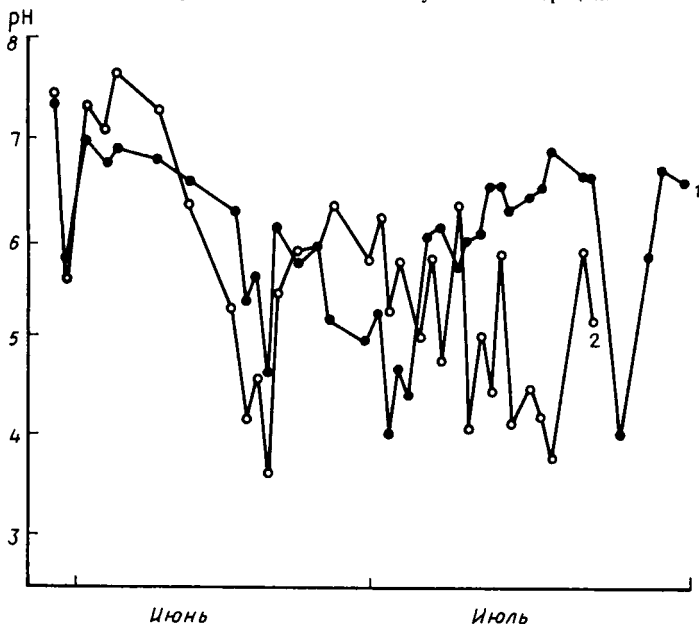
Томаты F₁ Карлсон

1	24	146	180	16,0	120
2	—*	—*	—*	0,8	2,3
3	0,4	—*	—*	1,0	3,6
4	0,8	—*	—*	—*	—*

* Содержание азота находилось за пределами чувствительности прибора.

Рис. 3. Изменение pH питательного раствора корневой среды при выращивании огурцов. Опыт 1.

1 — контроль; 2 — постоянная искусственная аэрация.



наружены в следующих количествах (мг/л); NO_3 — 30; P_2O_5 — 10; K_2O — 130; Ca — 70; Mg — 30.

Главным итогом опытов с рыбами следует считать доказательство функционирования этой экологической системы в течение длительного времени и получение чистой продукции сразу двух видов — рыбы и овощей.

pH питательного раствора. Для опыта 1 характерна необычно высокая кислотность. В тех вариантах, где томаты росли хорошо, pH резко снижался после внесения очередной дозы мочевины (рис. 2). Поскольку в среде не обнаружено нитратного азота, который мог бы образоваться за счет процессов нитрификации, надо полагать, что сильное подкис-

ление происходило вследствие различия в скорости поглощения анионов и катионов, а также избыточного количества углекислоты, образующейся при аэрации ($\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_2$).

При нарушении равновесия жизненных процессов из-за неблагоприятного режима аэрации и повышенной концентрации аммония в питательном растворе растения огурца переставали поглощать азот, который накапливался в виде аммония и приводил к существенному подщелачиванию среды (табл. 11, рис. 3).

Повышенное содержание аммонийного азота в растворе способствовало развитию вершинной гнили плодов у томата (табл. 1, вариант 1).

Рис. 4. Изменение электропроводности питательного раствора корневой среды при выращивании томатов. Опыт 1.
1, 2, 3, 4 — варианты опыта.

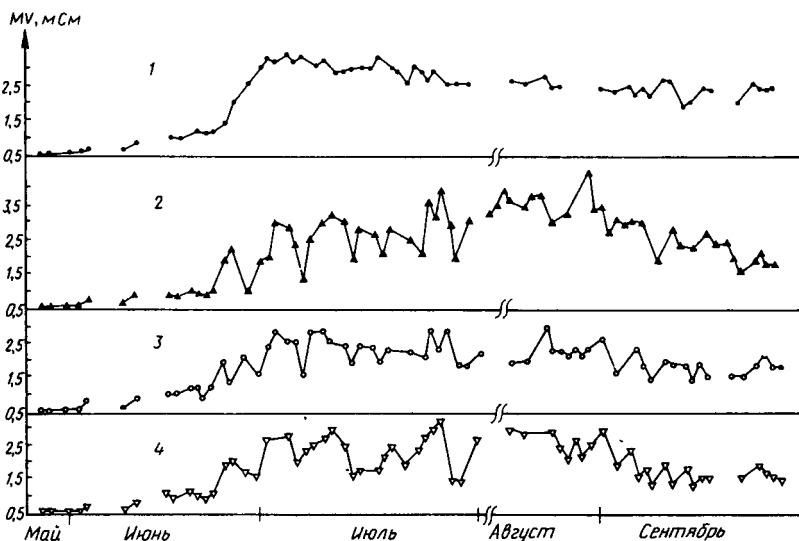


Таблица 11

Содержание основных катионов (мг/л) в питательном растворе в процессе вегетации томатов (в числителе) и огурцов (в знаменателе)

Вариант	Калий	Кальций	Магний	Железо	Марганец
<i>26 июля</i>					
1	120	16	31	1,8	2,0
	55	17	37	1,3	0,1
2	115	10	23	2,7	2,2
	90	36	44	0,2	0,5
3	130	8	26	2,5	1,5
	85	28	43	4,6	2,0
4	110	8	21	2,3	1,8
	90	39	52	3,3	0,63
<i>17 июля</i>					
1	90	60	59	0,2	3,0
	44	56	42	1,1	0,3
2	198	44	50	0,3	0,1
	86	83	54	0,5	2,3
3	185	46	45	0,2	0,1
	78	94	59	1,6	1,6
4	100	53	53	0,5	1,6
	80	100	63	8,2	1,2
<i>20 августа</i>					
1	90	101	62	0,7	1,7
	80	114	45	2,5	0,4
	80	161	61	3,7	1,1
2	83	110	60	4,0	0,4
	54	142	42	1,8	0,6
3	80	110	65	3,5	1,4
	65	159	43	3,0	0,3
4	100	120	50	2,0	0,7
<i>13 октября по томатам</i>					
1	85	184	61	3,9	0,8
2	1	187	64	2,9	0,8
3	2	182	61	0,4	0,4
4	40	138	47	3,5	0,1
<i>24 октября по томатам</i>					
1	0	190	65	3,5	0,7
2	0	190	65	3,1	0,5
3	0	164	53	2,9	0,6
4	60	107	41	2,2	0,2

В системе рыба — овощи значения рН находились в основном в интервале 7,2—8,5. При добавлении сернокислого калия происходило некоторое снижение рН. Тем не менее растения не проявляли признаков недостаточности железа, марганца и других микроэлементов. В то же время в опытах с минеральным питанием, проведенных ранее, при рН 7,2—7,5 в течение двух недель в период интенсивного роста у растений полностью желтели молодые листья и точки роста. При снижении рН до 5,5—6,5 за такой же промежуток времени наблюдалось восстановление пигментации. Следовательно, в системе рыба — овощи катионы металлов находятся в хелатированном состоянии, что дает возможность растениям использовать их и в щелочной среде.

Электропроводимость. Поскольку агрохимический анализ питательного раствора (опыт 1) проводили редко, основным сигналом обратной связи для оценки составленной программы являлись значения электропроводимости корневой среды (рис. 4). В основном они находились ниже отметки 3 мСм. Следовательно, растения не страдали от повышенного осмотического давления корневой среды и, естественно, от недостатка воды.

Кислород. Определение содержания кислорода в питательном растворе связано с методическими трудностями. Для точного выяснения динамики содержания кислорода необходимы точечные датчики. Нами использован метод Винклера [10]. Во время отбора проб происходило турбулентное перемешивание раствора и его соприкосновение с воздухом, что искажало значения истинного содержания кислорода в определенной точке корневой среды. Тем не менее обнаружено пониженное его содержание

Т а б л и ц а 12
Содержание растворимого кислорода (мг/л)
в питательном растворе при различных
режимах аэрации (томаты)

Ва- риант	30/V	2/V1	13/IX	14/IX	15/IX
1	4,5	3,3	0,5	5,2	2,4
2	7,0	8,0	4,5	8,7	4,9
3	7,2	7,0	5,7	5,8	7,9
4	6,8	8,6	1,0	2,2	6,2

в варианте без аэрации (опыт 1, табл. 12). В вариантах 2 и 3 кислород определяли перед началом пропускания раствора.

В системе рыба — овощи питательный раствор после оксигенатора насыщался кислородом приблизительно на 100 %. На выходе из аквариума его содержание значительно снижалось и колебалось в больших пределах — 1,5—8 мг/л. На дне желобов, в которых выращивали растения, накапливались остатки корма и активный ил. Это приводило к конкуренции за кислород между корнями растений и микроорганизмами. Обычно после очистки желобов от активного ила жизнедеятельность вновь образовавшихся корней продолжалась не более двух недель, затем они погибали. Активная часть корней развивалась в основном в минеральном субстрате и рассадном торфяном кубике.

Модель регулирования аммонийного питания растений в водной культуре

Уравнение баланса азота в системе корневая среда — растение при постоянном объеме первой записывается следующим образом:

$$N = N\downarrow - N\uparrow, \quad (1)$$

где N — азот корневой среды; $N\downarrow$ — вносимый азот; $N\uparrow$ — азот, поглощенный растениями.

Для удобства сопоставления с имеющимися рецептами питательных растворов введем обозначение концентрации азота $[N]$, которая выражается уравнением

$$[N] = Q \cdot V, \quad (2)$$

где Q — количество внесенного азота; V — объем корневой среды.

Нас интересуют возможные колебания концентрации азота в корневой среде $[N_r]$ в течение вегетации в зависимости от способа корректировки. Динамику любого процесса можно записать как уравнение баланса скоростей. За бесконечно малый промежуток времени выполняется соотношение

$$\frac{d[N]}{dt} = \frac{d[N\downarrow]}{dt} - \frac{d[N\uparrow]}{dt}, \quad (3)$$

где t — время.

Концентрацию ионов в питательном растворе следует увязывать со способом корректировки во время вегетации. Особое значение это имеет для растворов, содержащих разные формы азотных ионов, поскольку скорость поглощения растениями аммонийного и нитратного ионов различна. Учет этого факта позволит, с одной стороны, избежать излишнего поглощения нитратов и аммонийного отравления растений, с другой — даст возможность регулировать pH среды при помощи физиологического воздействия на систему.

Воспользуемся результатами опытного определения аммонийного азота, поглощенного томатами и огурцами (фаза плодоношения) из питательного раствора в водной культуре (рис. 5).

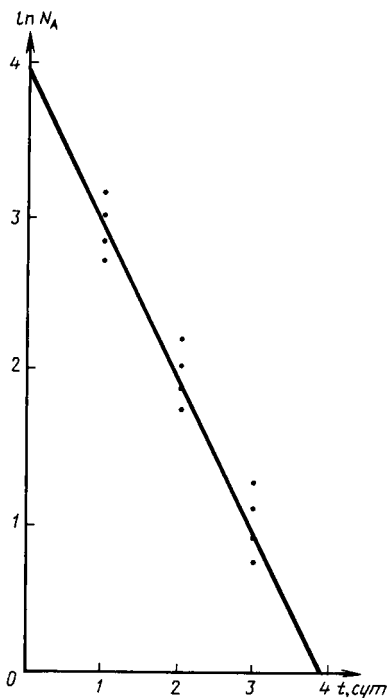


Рис. 5. Изменение логарифма концентрации аммиачного азота питательного раствора корневой среды в период максимального роста огурцов и томатов в водной культуре.

Снижение концентрации аммиачного азота в корневой среде $[N_A]$ аппроксимируется показательной функцией

$$[N_A](t) = [N_{A_0}] \cdot e^{-Kt}, \quad (4)$$

где N_{A_0} — содержание аммиачного азота в корневой среде в момент времени $t=0$; K — удельная скорость убавления.

Задача корректировки питательного раствора корневой среды заключается в возмещении убывающего азота путем дискретного или постоянного его добавления.

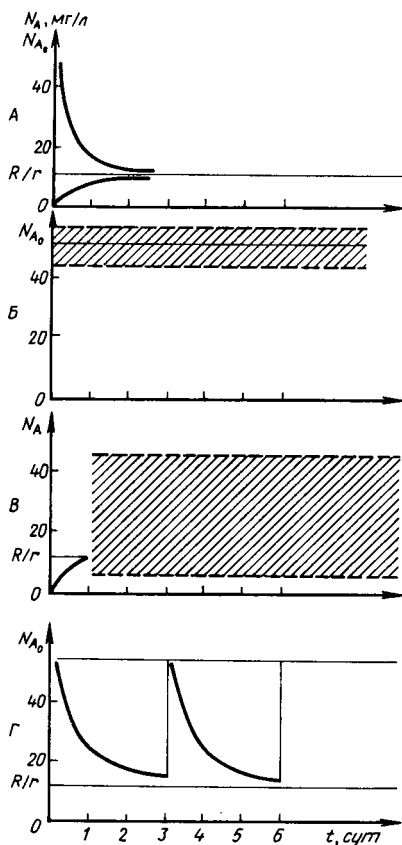
Рассмотрим разные технологиче-

ские варианты решения этой задачи (рис. 6) при следующих условиях: азот поглощается равномерно во времени; корректировку проводят, приняв за основу питательную смесь известного состава; смесь содержит аммиачный и нитратный азот.

Вариант А. Корректировку про-

Рис. 6. Разные технологические варианты корректировки концентрации азота в питательном растворе корневой среды.

А — автоматическая — датчик электропроводности; *Б* — автоматическая — ионоселективный датчик; *В* — рыба — овощи; *Г* — дискретная корректировка.



водят автоматически. Выходной сигнал системы — электропроводность раствора корневой среды. Уравнение баланса имеет вид

$$\frac{d[N_A^A]}{dt} = R - K[N_A^A], \quad (5)$$

где N_A^A — концентрация аммонийного азота в питательном растворе при автоматической корректировке по его значению на выходе в единицах электропроводности; R — константа скорости внесения аммонийного азота в корневую среду, выраженная через концентрацию.

Решив уравнение (5), получим

$$[N_A^A](t) = \frac{R}{K} - \left(\frac{R}{K} - [N_{A_0}^A] \right) \cdot e^{-Kt}, \quad (6)$$

т. е. $[N_A^A](t)$ стремится к равновесному состоянию $R:K$ (асимптота), при $[N_A^A](t)$ уменьшается, когда $[N_{A_0}^A] > R:K$, и увеличивается, когда $[N_{A_0}^A] < R:K$.

Концентрация нитратов $[N_N]$ в равновесном состоянии определяется уравнением

$$[N_N] = [N_r] - R:K. \quad (7)$$

Скорости поглощения растением аммонийного и нитратного ионов постоянны и равны между собой.

Вариант Б. Корректировку производят автоматически при помощи ионоселективных средств контроля; $[N_A^A](t)$ поддерживается на заданном уровне.

Вариант В. Биологическая саморегуляция. Происходит самокорректировка системы за счет взаимосвязи живых организмов в замкнутой экологической системе через продукты обмена веществ. Примером может служить совместное выращивание рыбы и овощей в водной культуре. Динамика содержания N_A будет зависеть от свойств этой системы и условий окружающей сре-

ды. $[N_A]$ не задается и не регулируется оператором. Она устанавливается на уровне, исключающем отравление живых организмов.

Вариант Г. Дискретная корректировка на основе анализа элементного состава корневой среды. Для этого варианта существенное значение приобретает частота корректировки $1:T$. Здесь T — период времени между корректировками, он определяется по формуле

$$T = \frac{\Delta C V}{U}, \quad (8)$$

где C — допустимое снижение концентрации какого-либо элемента питательного раствора среды; V — объем корневой среды; U — количество потребляемого элемента минерального питания за единицу времени.

Для конкретной системы ΔC и V постоянны, тогда как U в течение вегетации меняется и является функцией времени, которую трудно определить. Поэтому T , а следовательно, и частота $(1:T)$ на практике обычно задаются дискретно для двух-трех периодов онтогенеза, при этом не придерживаются строго заданного ΔC .

На рис. 6 показана динамика содержания аммонийного азота в корневой среде при условии, что азот поглощается растениями с постоянной скоростью, а объем питательного раствора автоматически поддерживается на исходном уровне путем долива воды в систему.

Обсуждаемая математическая модель имеет константу времени $\tau = 1:K$. Как известно, время, за которое система практически достигает состояния равновесия, $T_{0,95} = 3\tau$ [5]. Для нашего примера это означает, что после скачкообразного изменения подачи аммонийного азота в корневую среду его концентра-

ция в питательном растворе через трое суток достигнет значения R:K. При этом имеется в виду, что величина скачка не выходит за пределы, допускающие отравление растений аммонием.

В опыте рыба — овощи параметры системы изменяются в зависимости от условий окружающей среды, поэтому концентрация аммония колеблется в широких пределах (рис. 7). Повышение концентрации аммонийного азота в отдельные периоды вегетации было связано с недостатком кислорода в растворе.

На стенках конструкций (см. рис. 1) в течение вегетации образовывалась пленка так называемого активного ила. В 1984 г. эту массу удаляли вручную 2 раза за вегетацию, что нарушало равновесие в системе, в 1985 г. — 1 раз в 2 нед.

Если провести аналогию с природными условиями произрастания растений, то становится очевидной

необходимость снижения амплитуды и частоты колебания содержания азота, в частности аммония, в корневой среде. Современными средствами автоматизации можно достичь высокой степени регулируемости данного фактора. Но поскольку стоимость объекта при этом значительно возрастает, в тепличном производстве такие системы пока не используют.

В варианте Г, где осуществляют дискретное регулирование, приходится увеличивать частоту анализов и корректировок. Например, если во время плодоношения культуры $[N] = 210$ мг/л, $[N_{A_0}] = 52,5$ мг/л, $V = 10$ л и $K = 1$, то через сутки $[N_A] \approx 33,0$ мг/л. Чтобы не допускать снижения $[N_A]$ более чем на 37 % от исходного, анализ и корректировку следует проводить не реже 1 раза в сутки. Это непрактично.

Анализ обсуждаемой модели показывает, что для поддержания режима аммонийного питания растений на низком уровне необходимо автоматизировать систему его внесения по принципу обратной связи, причем сигнал на выходе из системы должен показывать концентра-



Рис. 7. Изменение концентрации аммонийного азота в системе рыба — овощи.

1 — 1984 г.; 2 — 1985 г.

цию аммония. Биологические системы саморегулирования являются альтернативой техническим автоматизированным системам.

Выводы

1. Показана возможность получения высоких урожаев плодов огурцов и томатов в замкнутой гидропонной системе без смены питательного раствора при низком уровне минерального питания в течение длительного периода вегетации. За этот период растения практически полностью использовали азот, калий и другие биогенные элементы из корневой среды, что с точки зрения экологии является полезным.

2. Существенное повышение продуктивности растений в водной культуре томатов при аммонийном питании достигалось в случае постоянной искусственной аэрации питательного раствора. Высокий урожай плодов огурца получали при дозе аммонийного азота 6,5 г на растение и постоянной искусственной аэрации, а также при более низком уровне питания (4,8 г N на растение) при естественной аэрации. Периодическая аэрация давала отрицательный эффект.

3. Система рыба — овощи в гидропонной культуре тепличного томата саморегулирует процесс минерального питания растений, обеспечивая условия жизнедеятельности для рыб и растений в течение длительного периода вегетации — 8 мес.

4. Поддержание аммонийного питания растений постоянно на низком уровне (20 мг N на 1 л) возможно при автоматизированной системе регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюшин А. М., Дерюгин И. П., Кулюкин А. Н., Ягодин Б. А. Удобрение в интенсивных технологиях возделывания с.-х. культур.— М.: Агропром-

издат, 1991.— 2. Бенгли М. Промышленная гидропоника. — М.: Колос, 1965.— 3. Вендло Г. Г., Миканев Т. А., Петриченко В. Н. и др. Удобрение овощных культур. — М.: Агропромиздат, 1986.— 4. Глунцов Н. М. Агрехимическая лаборатория овощеводства.— М.: Росагропромиздат, 1989.— 5. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы.— М.: Мир, 1966.— 6. Жукков Ю. П. Система удобрений в хозяйствах Нечерноземья.— М.: Московский рабочий, 1983.— 7. Журбицкий З. И. Теория и практика вегетационного метода.— М.: Наука, 1968.— 8. Кретович В. П. Усвоение и метаболизм азота у растений.— М.: Наука, 1987.— 9. Кулюкин А. Н., Литвинов Б. В. Выращивание огурца и томата на малообъемном торфяном субстрате при использовании медленнодействующих источников элементов.— Изв. ТСХА, 1984, вып. 3, с. 125—133.— 10. Лурье Ю. Ю., Рыбникова А. И. Химический анализ производственных сточных вод.— М.: Химия, 1974.— 11. Прянишников Д. Н. Азот в жизни растений.— Избр. соч. Т. I. М.: Изд-во АН СССР, 1951.— 12. Рыбоводно-биологические нормы вы по выращиванию карпа, форели в установках с замкнутым циклом водообеспечения.— М.: Мин-во рыб. хоз-ва СССР, Всесоюзный НИИ прудового рыб. хоз-ва, 1985.— 13. Рябов А. К., Сиренко А. А. Искусственная аэрация природных вод.— Киев: Наукова думка, 1982.— 14. Симидчиев Х. Тепличное овощеводство на малообъемной гидропонике.— М.: Агропромиздат, 1985.— 15. Смирнов П. М. Вопросы агрохимии азота.— М.: ТСХА, 1982.— 16. Ягодин Б. А., Смирнов П. М., Петербургский А. В. и др.— Агрохимия / Под ред. Б. А. Ягодина, 2-е изд. М.: Агропромиздат, 1989.— 17. Яржомбек А. А., Лиманский В. В., Щербина Т. В. и др. Справочник по физиологии рыб.— М.: Агропромиздат, 1981.— 18. Burgoon P. S., Bdm C.— Proc. of the 6th Intern. Congr. on soilless culture.— Wageningen, 1984.— 19.— Ronald J., Sutton, William M. Lewis.— Proc. Fish — Cult., 1982, vol. 44, N 1, p. 55—59.— 20. Wilcox G. E., Magalhaes J. R., Silva F. L.— J. of Plant Nutrition, 1985, vol. 8, N 11, p. 989—998.

Статья поступила 27 июня 1991 г.

SUMMARY

Tomatoes and cucumbers were grown hydroponically in greenhouse (experiment 1), as well as in closed system fish — plants (experiment 2), where urea and products of fish metabolism were the source of reduced nitrogen for plants. Plant production varied greatly with conditions of aeration for nutrient solution of root medium. Constant artificial aeration provides high productivity of plants. The system of regulating the amount of ammonium nitrogen in nutrient solution of root medium is simulated.