

Повреждения растений фитотоксичными газами при искусственном досвечивании

*Богданов К.Б. (bkb@list.ru),
ООО «Агроконсалт» / ООО «ССФ «ГИСОК»*

Новое явление старой проблемы

После массового перехода российских тепличных комбинатов к выращиванию овощей при интенсивном электрическом досвечивании, в некоторых хозяйствах стали наблюдаться «загадочные» случаи повреждения растений. Несмотря на высокий уровень агротехники, рост растений замедляется, хлоропласты начинают разрушаться (в различной степени), на листьях проявляются разного рода светлые мозаичные пятна и краевые ожоги, и поэтому собрать плановый высокий урожай уже не получается. Для частичного выхода из ситуации, как правило, приходится уменьшать уровень освещённости и (или) сокращать период досвечивания, что ведёт к добавочному снижению урожайности и, соответственно, невыполнению поставленных бизнес-планов. Особенно неприятно, когда хозяйство под светокультуру запустило собственный энергоцентр на базе мощных газопоршневых установок, и может получать для производства своё недорогое электричество, тепло и углекислый газ.

Как водится, виноватыми считают селекционные фирмы: то ли их разрекламированные гибриды для светокультуры на самом деле не выдерживают мощный поток света, то ли небрежное семеноводство – семена заражены неведомым заболеванием. Недовольные агрономы с разных концов страны демонстрируют однотипные фотографии поврежденных листьев и дискутируют о некорректном минеральном питании, о новых зловредных вирусах и некачественных субстратах, и прочее и прочее...

Безусловно, исключать наличие инфекции без специального исследования заранее нельзя, но в 8 случаях из 10 причина определятся при первом взгляде и минимальной дополнительной информации – это характерные признаки хронического повреждения огурца и томата сопутствующими продуктами сгорания углеводородного топлива, фитотоксичными газами – оксидами азота (NO , NO_2) и диоксидом серы (SO_2), реже этиленом (C_2H_4). На все эти симптомы, причём в гораздо более тяжёлых формах, специалисты старшего поколения нагляделись с 90-х годов прошлого века и до середины 2000-х годов – при массовом использовании подкормки отходящими газами от отечественных котлов (ПТВМ, КВГМ, ДКРВ и других).

Непонятно, почему такая достаточно изученная тема вызывает вопросы у нынешних специалистов-агрономов. Число публикаций экологов и ботаников про повреждение растений атмосферными загрязнителями (NO_x и SO_2) не поддается подсчёту. Масса фотографий и описание признаков повреждения растений в теплицах печаталось в многочисленных иностранных источниках, как прошлых десятилетий, так и современных. Материалы на этой тематике регулярно размещаются в популярном журнале «Мир теплиц», методы решения были рассмотрены в известных русскоязычных публикациях, докладывались на многих тематических семинарах Ассоциации «Теплицы России».

Агробиологический аспект проблемы

В среднем, растение синтезирует из воды и углекислого газа порядка 94% массы сухого вещества, остальные 6% массы оно получает из минеральных веществ. Поэтому в несезонное время невозможно достичь высокой урожайности огурца не менее 80 кг/м² и томата более 50 кг/м² без стабильного поддержания концентрации углекислого газа на уровне 500-1000 ppm и уровня искусственного досвечивания не менее 12 клк, при продолжительности 16-19 ч/сутки. Искусственное световое излучение большой мощности (по крайней мере, до 500 Вт/м²), не выходящее спектрально за границы ФАР 380-710 нм в ультрафиолетовую об-

ласть, и при продолжительности светового дня не более 18-19 часов (огурец), само по себе не способно повредить современным гибридам овощных растений, выведенным для интенсивной светокультуры.

Максимальные допустимые концентрации фитотоксичных газов

При применяемых технологиях подкормки CO₂ в 1985-2000 гг. (прямая газация при помощи газогенераторов, нагнетание отходящих газов котельной, использование жидкой и баллонной углекислоты), всегда существовала большая или меньшая вероятность попадания в воздух теплицы сопутствующих соединений, опасных для культурных растений или человека.

В Нидерландах, Институтом исследований по защите растений (IPO) и Научно-исследовательской станцией цветоводства и тепличных овощей (PBG), к 1999 г. были обобщены научные, опытные данные и опубликованы предельные значения концентрации фитотоксичных газов при традиционных условиях выращивания (естественная освещённость, умеренная концентрация CO₂) [1]. Эти значения на многие годы стали неофициальным стандартом отрасли защищённого грунта для Европы и остального мира (табл. 1).

Таблица 1

Предельные значения концентрации фитотоксичных газов для предотвращения повреждения тепличных культур (PBG, 1999 г.)

Газ	Химическая формула	Эффект воздействия			
		острый	хронический	острый	хронический
		ppb		мг/м ³	
Аммиак	NH ₃	3300	197	2,54	0,15
Оксид азота	NO	1000	250	1,25	0,31
Диоксид азота	NO ₂	600	132	1,15	0,19
Озон	O ₃	100	28	0,20	0,06
Диоксид серы	SO ₂	70	15	0,19	0,04
Этилен	C ₂ H ₄	50	8	0,06	0,01

* 1 ppm = 1000 ppb = 10⁻⁹ об.%; м³ – пересчёт на нормальные условия (для температуры 0°C и давления 101 325 Па)

Показательно, что кратковременное воздействие относительно высоких концентраций (острая экспозиция) приводит к меньшему количеству повреждений по сравнению с продолжительным воздействием более низких концентраций (хроническое воздействие). Чувствительность к токсичным газам отличается для каждого вида растений и для каждого сорта. У растений одной популяции (гибрида) почти всегда будет различная степень восприимчивости к каждому соединению и/или к их комбинации. Уровень чувствительности в каждый отдельный момент времени зависит от степени открытия устьиц на листьях и молодых побегах. Существенному усилению повреждений способствуют высокая температура и влажность воздуха, интенсивная солнечная (искусственная) радиация, т.е. все позитивные факторы, повышающие газообмен хлоропластов. Повреждения уменьшаются при снижении освещённости и температуры воздуха до определенного предела, поскольку в этих условиях уменьшается физиолого-биохимическая активность тканей растения.

С течением времени технологии выращивания в защищенном грунте совершенствовались. Стали повсеместно строиться теплицы нового поколения с высоким коньком, активно внедряются мощные газопоршневые энергоустановки, повсеместно используется интенсивное искусственное досвечивание (10-15 клк и более), наконец, появляются всё новые и новые гибриды овощных культур. В связи с интенсификацией технологий, возникла потребность в уточнении уровня вредности указанных химических соединений в новых производственных и экономических условиях. Недостатком предыдущих показателей была неопределенность периода воздействия соединения для того, чтобы вызвать хроническое или острое повреждение растения. Поскольку большинство веществ имеют накапливаемый эффект воздействия, то пороги повреждения не корректно было просто суммировать.

Поэтому в 2008-2012 гг. в Нидерландах, сотрудниками Университетского и исследовательского центра в области тепличного садоводства (Wageningen UR Glastuinbouw), были проведены новые исследования [2-5] – по газам, которые наиболее опасны для растений (в первую очередь при искусственном досвечивании), и вероятность попадания которых в воздух теплицы наибольшая при применении востребованных технологий подкормки (нагнетание отходящих газов тепловых котлов, подача очищенных выхлопов газопоршневых установок). Результаты исследований рассчитали аналогично директивам ВОЗ для человека – через продолжительность воздействия токсиканта на объект [3]. В настоящее время, для ведения высокорентабельной светокультуры отечественных и импортных гибридов овощных и цветочных культур по уровням диоксида серы, оксидам азота и этилена следует руководствоваться именно этими показателями (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные допустимые концентрации фитотоксичных газов в воздухе теплицы (WUR, 2011 г.)

Фитотоксичный газ	Химическая формула	Продолжительность воздействия	Максимально допустимая концентрация	
			ppb	мг/м ³
Диоксид серы	SO ₂	24 часа	100	0,29
		среднегодовое	30	0,09
Оксиды азота	NO + NO ₂	24 часа	40	0,08
		среднегодовое	16	0,03
Этилен	C ₂ H ₄	8 часов	11	0,01
		4 недели	5	0,006

* 1 ppm = 1000 ppb = 10⁻⁹ об.%; м³ – пересчёт на нормальные условия (для температуры 0°С и давления 101 325 Па)

Приведенные в таблице значения используются в последние годы в Западной Европе как пороговые величины для стационарных тепличных газоанализаторов последнего поколения (например, MACView®-Greenhouse Gas Analyser).

Воздействие фитотоксичных газов на человека

На практике, превышение вышеуказанных концентраций фитотоксичных газов мало заметно для человека (табл. 3), но культурные растения несравнимо более к ним чувствительны.

Таблица 3

Предельно допустимые концентрации некоторых газообразных веществ для человека в атмосферном воздухе [12,13], мг/м³

Соединение	Химическая формула	Класс опасности	ПДК в воздухе*			
			рабочей зоны		населённых мест	
			максимальная разовая	средне-сменная	максимальная разовая	средне-суточная
Озон	O ₃	1	0,1	–	0,16	0,03
Оксид азота	NO	3	–	–	0,4	0,06
Диоксид азота	NO ₂	3	2	–	0,2	0,04
Оксиды азота (в пересчёте на NO ₂)	NO _x	3	5	–	–	–
Диоксид серы	SO ₂	3	10	–	0,5	0,05
Аммиак	NH ₃	4	20	–	0,2	0,04
Этилен	C ₂ H ₄	3	100**	–	3,0	–
Оксид углерода	CO	4	20***	–	5,0	3,0
Диоксид углерода	CO ₂	4	27000	9000	–	–

* Нормативы указаны для температуры 20°С и давления 101 325 Па (ГОСТ 12.1.005-1988), для пересчёта на нормальные условия их следует умножить на 1,073.

** Предельно допустимая концентрация по Методическим указаниям МУК 4.1.1306-03.

*** При длительности работы в атмосфере, содержащей оксид углерода, не более 1 ч предельно допустимая концентрация может быть повышена до 50 мг/м³, при длительности работы не более 30 мин. – до 100 мг/м³, при длительности работы не более 15 мин. – до 200 мг/м³; повторные работы при условиях повышенного содержания оксида углерода в воздухе рабочей зоны могут проводиться с перерывом не менее чем в 2 ч.

Углекислый газ (CO_2) и угарный газ (CO), в концентрациях, заведомо опасных для здоровья и даже жизни человека, растениям в теплицах непосредственного вреда не наносят.

Воздействие фитотоксичных газов на тепличные растения

Воздействие фитотоксичных газов часто воспринимаются агрономами как повреждение листьев от критически завышенного уровня CO_2 . Однако, сам по себе углекислый газ в избыточных концентрациях (более 1500 ppm) не опасен для растения, но при потенциальном водном дефиците вызывает рефлекторное закрытие устьиц, и, соответственно, ограничение транспирации. Лишённые возможности охлаждаться, листья на свету перегреваются, и, начиная с краёв, происходит термическое повреждение и отмирание тканей.

В современных производственных условиях концентрация токсичных газов снова стала фактором, ограничивающим урожайность и рентабельность светокультуры тепличных овощей – но уже на ином уровне. Так, общее воздействие токсичных газов заключается в нарушении многих биохимических процессов в растении, и в первую очередь начинается с воздействия на фотосинтез. Во всех случаях, наличие в воздухе опасных соединений частично или даже полностью ликвидирует ожидаемую прибавку урожая от подкормки углекислым газом.

Повреждения растений можно классифицировать как невидимые, хронические и острые. Первая степень повреждения – без видимых глазом признаков ущерба – проявляется единственно в снижении биологической продуктивности растений лишь за счёт понижения интенсивности фотосинтеза. То есть, несмотря на высокую агротехнику, урожайность не превысит определенный, пусть и достаточно высокий уровень, хотя потенциал гибрида заведомо ещё не исчерпан. Поиск «невидимой» причины стагнации урожайности может отнять слишком много времени и средств.

При производственных процессах, связанных со сжиганием природного газа, содержание оксида азота NO в дымовых газах составляет 95-98%, диоксида азота NO_2 – 2-5%. Малоизвестный момент, объясняющий особую опасность соединений азота для светокультуры, и, в первую очередь, при использовании металлогалогенных ламп. Присутствие в электромагнитном спектре мощных ламп длинноволнового (зона А) и средневолнового ультрафиолетового излучения (зона В) во внимание обычно не принимается из-за его незначительной относительной доли и поглощения слоем воздуха. Однако, при интенсивном световом излучении в замкнутом объёме теплицы (суммарная установленная мощность ламп достигла 1,5-2 МВт/га!), реакционная способность части молекул NO и особенно NO_2 многократно повышается, т.к. они могут переходить в возбужденное метастабильное состояние (эффект фотовозбуждения). Также облучение инициирует фотохимическое окисление некоторых молекул оксида азота NO в не менее токсичные для растений молекулы диоксида азота NO_2 . Вероятны и обратные фотохимические реакции с освобождением атомарного кислорода и образованием молекул опаснейшего для живых организмов озона O_3 .

Первоначальные признаки хронического повреждения растений оксидами азота $\text{NO}+\text{NO}_2$ проявляются как форма хлороза – в беспорядочном распространении обесцвечивающих пятен светло-зелёного оттенка. Падает ферментная активность белков, уменьшается содержание хлорофилла. Картина похожа на признаки недостаточности некоторых элементов минерального питания (Mg , Fe). Дальнейшее воздействие на растения проявляется в постепенном осветлении, морщинистости листьев и характерной кайме по их краям – из-за развивающегося нарушения устьичной проводимости; наблюдается торможение плодоношения и роста, увядание цветков.

Механизмы действия оксидов азота на живые клетки растений сложны и различны, причём трудно сказать, какое вещество опаснее в плане долгосрочных последствий. Оба соединения, вследствие своей высокой реакционной способности, обладает местным высокотоксичным действием. В то же время молекулы оксида азота NO , по современным научным представлениям, выполняют сигнальные функции, вызывая своим воздействием в клетке,

ткани и организме те или иные биохимические и физиологические процессы (газотрансмиттер).

В воде оксид азота мало растворим, и с ней не реагирует, однако его молекулы могут перемещаться на небольшие расстояния внутри клетки и между клетками, проникая через мембранные барьеры. Молекулы проникают путем прямой диффузии через устьица в межклеточное пространство (экзогенный NO); и в виде нитрит-иона (эндогенный NO) – при растворении диоксида азота в клеточном соке проходит реакция с образованием азотной и нестойкой азотистой кислот. Этими путями из воздушной среды непосредственно в живые ткани растения попадет только ничтожная часть молекул, но для выполнения ими сигнальных функций достаточно и наномолярных концентраций.

Оксид азота обладает широчайшим спектром биологического действия, обуславливая активацию и ингибирование цепных свободнорадикальных реакций. Сигнальные каскады NO тесно связаны с продуцированием ауксинов. Известно, что это соединение участвует в защитных реакциях растений (в т.ч. может запустить реакцию сверхчувствительности), процессах морфогенеза корневой системы и образовании придаточных корней, формировании почек и побегов, устьичных движениях, контроле цветения, тропизме органов. Подтверждается экспериментально причастность соединения к репрограммированию генома растительных клеток. Также показаны изменения уровня экспрессии многих растительных генов при воздействии данного газотрансмиттера [8, 10, 11].

Разрушительное действие оксидов азота на растения существенно усиливается в присутствии диоксида серы. Вещество ограничено растворимо в воде с образованием нестойкой сернистой кислоты. Признаки хронического повреждения проявляются преимущественно в форме некроза, поскольку SO₂ является местным ядом, убивающим те участки мезофилла листа, в которые он проник, и мало затрагивающим жизнедеятельность соседних участков мезофилла. Проникая в межклетники растительных тканей через устьица, молекулы SO₂ реагирует с клеточными оболочками, воздействуют на все компоненты цитоплазмы, и прежде всего, на хлоропласты. Соединение непосредственно действует на дисульфидные мостики белков и на фотосинтетические ферменты, проявляя себя как фотосинтетический яд [6]. Оно способно накапливаться в тканях растения, отчего эффект повторного воздействия существенно увеличивается (кумуляция).

Этилен (этен) C₂H₄ является общеизвестным гормоном старения растений, его также относят к группе биологических газотрансмиттеров. Нидерландские исследователи считают этот газ, пожалуй, самым нежелательным химическим соединением для тепличных растений [2]. Соединение частично растворимо в воде, но с ней не реагирует; его молекулы способны быстро перемещаться по клеточным тканям и межклеточному пространству ко всем органам растения, а также диффундировать обратно в окружающий воздух. Характерный эффект воздействия этилена – тоже пожелтение листьев, что обусловлено распадом хлорофилла и снижением количества белков в ускоренно стареющих тканях. Процессы роста молодых побегов и листьев затормаживаются; вероятно массовое опадение цветков и завязей. Этилен может индуцировать эпинастию – изменение угла наклона черешка к стеблю, в результате чего листья уходят от прямого действия световых лучей.

Совместное воздействие смесей газов непостоянного состава (токсиканты + газотрансмиттеры) на овощные растения может проявляться в самых непредсказуемых формах (эффект коктейля). В целом, признаки хронического повреждения зрительно проявляются не ранее 2-х недель воздействия токсичных соединений в концентрациях выше предельных (табл. 1, 2); но этот срок зависит от десятков факторов. Степень повреждения значительно обостряется при водной недостаточности, и всегда при слишком длительном световом дне.

Интересно, что во многих случаях листья с признаками повреждения перестают привлекать вредителей из-за изменившегося состава клеточного сока. По некоторым данным, насекомые (как вредители, так и полезные) тоже чувствительны к повышенному уровню диоксида азота NO₂. На поврежденных органах растения нередко развиваются бактерии и

грибы (вторичная инфекция). В частности, значительное ослабление защитных функций и изменяющаяся биохимия может провоцировать развитие штаммов вирусов, которые в нормальных условиях не поражают данный вид растения.

Технические аспекты проблемы

Таким образом, технология подкормки растений при интенсивном досвечивании выделяются принципиальным требованием к химической чистоте, как подаваемой газовой смеси, так и всего объёма воздуха теплицы. Фитотоксичные газы могут попадать в воздух теплицы тремя путями: с подкормочной газовой смесью, с приточным воздухом, иногда непосредственно. К настоящему времени в России, и в других странах стала уже нередкой ситуация, когда большая часть загрязнителей попадает именно из окружающего атмосферного воздуха.

Загрязнители в подкормочной газовой смеси

Дозирование CO_2 от тепловых котлов и газопоршневых установок ограничивается предельным содержанием в воздухе теплицы этилена, оксидов азота и диоксида серы. В холодном климате России при низких температурах фрамуги стараются по возможности не открывать, поэтому максимальные допустимые концентрации фитотоксичных газов в закрытой теплице могут достигаться достаточно быстро.

Как правило, теплотехники при настройке горелок контролируют CO и NO_x в отходящих газах, но не определяют содержание вреднейших для растений C_2H_4 и SO_2 . Горелки импортных тепловых котлов при надлежащей настройке характеризуются высоким КПД и обеспечивают практически идеальное сгорание топливно-воздушной смеси, при низкой эмиссии оксидов азота и угарного газа. Этим объясняется популярность, в частности, котлов Crone с модулируемыми горелками типа Zantingh RKB – после конденсоров охлажденные и обезвоженные отходящие газы сразу допускается подавать для подкормки растений. Из вида ускользает следующее обстоятельство: «чистыми» отходящие газы будут только лишь при номинальном (максимальном) режиме работы котла (горелки), и при неизменном с момента настройки химическом составе топливного газа.

На средних, минимальных и тем более переходных режимах горения, при изменениях в составе природного газа, система электронного управления горелкой будет прекрасно обеспечивать наименьший расход топлива, отличную работу котла, но гарантировать необходимую чистоту отходящих газов уже нельзя. Газоснабжающая организация в России, выдавая «паспорт на газ», отвечает лишь за стабильность указанной там теплотворной способности топлива. Химический же состав природного газа – соотношение метана и прочих углеводородов, содержание общей серы, газообразного азота и прочих компонентов – может варьировать в небольших пределах еженедельно. На работе котлоагрегатов это совершенно не сказывается, но в отходящих газах может значимо вырасти количество непредельных углеводородов (алкенов), оксидов азота и серы. Повторюсь, что небольшие изменения концентрации токсичных газов в дыме никакой опасности для экологии и здоровья человека не несут, но они подаются в закрытый объём теплицы, и овощные растения к ним во много раз более чувствительны!

Наблюдается повсеместная уверенность, что «в нашей котельной в природном газе серы нет». На самом деле, это совсем не так: по ГОСТ 5542-87 и ОСТ 51.40-93 в природном газе допускается суммарное содержание сероводорода и меркаптановой серы до 56 мг/м^3 . Такое количество общей серы действительно не сказывается на работе ни тепловых котлов, ни энергоустановок. Тем не менее, реальные поставки ОАО «Газпром» в Европу производятся с концентрацией не более $7-8 \text{ мг/м}^3$. Это объясняется жёсткими требованиями Единой европейской спецификации на качество природного газа (EASEE-gas) по присутствию серосодержащих соединений – суммарно до 11 мг/м^3 . Таким образом, европейский овощевод мало беспокоится о попадании соединений серы в теплицу – в отличие от российского, рис-

кующего по ГОСТу получить до 10 мг диоксида серы в каждом кубометре отходящих газов (при $\alpha=1,2$). Очевидно, что тут никакой конденсор не спасёт, хотя часть растворившегося SO_2 уходит с водяным конденсатом.

Выхлопы газопоршневых установок не лучший источник для подкормки растений в современных теплицах – в первую очередь, из-за низкого процентного содержания CO_2 , обусловленного работой моторов на обеднённой газозоудушной смеси ($\alpha \sim 1,8$). В выхлопах отмечается очень высокое содержание угарного газа CO , оксидов азота NO_x и недогоревших углеводородов C_nH_m – т. е. непосредственная подача отходящих газов в теплицы абсолютно исключена. Для надлежащей очистки выхлопов двигателей, для подачи в теплицы традиционно применяют высокотехнологичные каталитические модули COdiNO_x (Hanwel E&E), GRHOX-I(M) (Discom B.V.) и другие. На выходе из модуля, концентрации CO , NO_x и C_2H_4 уже не превышают концентрации тех же веществ в отходящих газах современных тепловых котлов с горелками класса «Low NO_x » (Crone и ему аналогичные) – как правило, NO до 20 ppm, NO_2 до 13 ppm, C_2H_4 до 450 ppb. Соединения серы практически полностью связываются при химических реакциях в модуле, правда, ценой снижения ресурса блока SCR-катализаторов. Однако, стоимость устройства и его регламентного обслуживания сопоставима со стоимостью самого газового двигателя. Указанные предельные концентрации загрязняющих веществ выдерживаются только при 100% исправной работе всех цилиндров ГПУ.

Подавать газовую смесь от указанных систем следует исключительно в режиме устоявшейся работы установки: при любом сбросе/набросе нагрузки (особенно в «островном режиме» работы) прослеживаются кратковременные пиковые выбросы NO_x , также вероятны «проскоки» высокотоксичного для растений аммиака NH_3 . Газоанализаторы, которыми комплектуются эти устройства, на кратковременные пиковые выбросы не реагируют. Особое внимание следует уделять техническому обслуживанию датчиков NO_x и C_2H_4 в газовом тракте модулей, поскольку они быстро загрязняются, и будут давать неверные показания.

Покупная жидкая углекислота также иногда может стать источником фитотоксичных соединений. Согласно ГОСТу 8050-85, жидкая углекислота высшего сорта должна иметь чистоту 99,8%, и не содержать лабораторно определяемые примеси иных веществ, кроме воды. Подобный высокоочищенный продукт, который единственно подходит для подкормки тепличных растений и для использования в пищевой промышленности, стоит достаточно дорого (до 10 000 руб./т на начало 2015 г.). На практике нередки случаи покупки углекислоты, которая недостаточно хорошо очищена и пригодна больше для технического использования. В ней могут содержаться примеси минеральных масел, сероводорода, аммиака, этаноламинов и непредельных углеводородов [7]. Самостоятельно каждый раз проверять на тепличном комбинате этот продукт на содержание микропримесей достаточно сложно. Но в любом случае, использование жидкой углекислоты даже среднего качества намного безопаснее для растений, чем нагнетание отходящих газов от самых лучших тепловых котлов.

Особенности распределения воздушных потоков в конкретной теплице могут приводить к образованию локальных застойных зон с повышенной концентрацией вредных соединений. К растениям подкормочная газовая смесь поступает через перфорированные полимерные трубки (рукава), которые проходят вдоль каждого ряда от распределительного газопровода. Многометровые ряды облиственных высоких растений обладают значительным аэродинамическим сопротивлением. Во время усиленной подачи, газовая смесь не всегда равномерно смешивается с воздухом теплицы, поэтому концентрации загрязнителей в нижнем ярусе растений могут быть постоянно или эпизодически выше, чем на уровне верхушек. В переносе загрязняющих веществ участвуют как конвекция, так и ламинарная и турбулентная диффузия, благодаря чему образуется градиент концентрации – как по горизонтали, так и по вертикали пространства теплицы. Это явление более выражено в высоких теплицах, при полностью закрытых фрамугах и отсутствующих циркуляционных вентиляторах.

За последние три года прямо на территории крупных тепличных комбинатов были построены энергоцентры из нескольких газопоршневых агрегатов единичной мощностью 1-4 МВт; иногда машины поставлены в контейнерном исполнении, без высотных дымовых труб. Паспортный расход сухих выхлопных газов условной 1 МВт установки при 100% загрузке составляет 4 300 нм³/ч, с содержанием в них оксидов азота не менее 450 мг/нм³ (в пересчёте к 5% O₂). В выхлопах установок среди недогоревших углеводородов также присутствует этилен в значимых количествах [2], причём его содержание резко возрастает при загрузке моторов менее 75% и в режимах сброса/наброса мощности. Про существенное содержание диоксида серы в нашем природном газе, написано выше. Таким образом, каждые сутки рядом с теплицами условный энергоцентр мощностью 10 МВт выбрасывается в атмосферу не менее 460 кг только оксидов азота.

Экологическая экспертиза рассматривает, в конечном итоге, лишь вопрос о безопасности здоровья людей – не будут ли превышены ПДК загрязняющих веществ (табл. 3) в приземном слое воздуха на определенном расстоянии от факела(ов) выброса (энергоустановки и котлы). Однако фоновое содержание SO₂ и NO_x, соответствуя гигиеническим нормативам для человека, может при определенных погодных условиях периодически становиться неприемлемым для выращивания овощных растений. Динамика атмосферы такова, что реально наблюдаемые под факелом концентрации подчиняются вероятностным законам и могут меняться в широких пределах. В ряде случаев при излучении земной поверхности в ясные ночи наблюдается обратное распределение температуры с высотой (температурная инверсия). Часто подобные инверсии формируются на некоторой высоте над поверхностью земли – т.н. приподнятые инверсии. Инверсии препятствуют развитию конвективных движений воздушных масс и способствуют накоплению загрязнения в приземном слое. Это явление в условиях континентального климата России может наблюдаться во все времена года, но чаще бывает в зимние месяцы. Также при низких и (или) холодных источниках выбросов – это как раз выхлопные газы ГПУ после теплоутилизатора, повышенный уровень загрязнения воздуха наблюдается при слабых ветрах.

Даже в самой современной теплице при полностью закрытых фрамугах, кратность воздухообмена составляет не менее 0.5 объёма/ч, и поэтому концентрации всех без исключения газов достаточно быстро уравниваются с их фоновой атмосферной концентрацией. При самом малом открытии фрамуг, процесс выравнивания концентраций стремительно ускоряется. В такой ситуации, подача для подкормки отходящих газов котельной или ГПУ с допустимыми концентрациями SO₂, NO_x и C₂H₄ приведёт из-за синергического эффекта к хроническому отравлению растений не позднее середины культурооборота.

Непосредственное проникновение дымовых газов в теплицу

Дымовые газы с высоким содержанием загрязнителей могут проникнуть и прямо в теплицу. Это происходит, когда помещение (здание, контейнер) для ГПУ, теплового котла или модуля очистки конструкционно соединено с тепличным блоком, либо расположено вплотную к нему. При малейших утечках и сквозняках, неочищенные газы успешно просачиваются к растениям. Это явление сильнее проявляется при значительной разнице температур между помещением – источником загрязнения, тепличным блоком и окружающей атмосферой (в зимний период).

Весьма рискованно даже эпизодическое использование в теплицах во время вегетации растений машин с бензиновыми или дизельными двигателями – из-за очень высокого содержания алкенов (этилен, пропилен), сернистого газа и иных загрязнителей в продуктах сгорания отечественного жидкого топлива. Также не рекомендуется устраивать стоянки грузового и легкового транспорта в непосредственной близости к теплицам со светокультурой.

Варианты решения проблемы – для России

Практически бесполезные мероприятия

Проводить внекорневые подкормки соединениями азота и (или) магния. Также напра-сен химический анализ листьев для выяснения причины хлороза (некроза) – молекулы проникают в ткани растения в пикоколичествах. Уже случившиеся повреждения листьев огурца и томата от воздействия SO_2 и NO_x в общем случае необратимы.

После появления признаков повреждения растений поздно отбирать пробы воздуха в теплице – измерять содержание возможных загрязнителей надо было 2-3 недели назад, причем постоянно, или как-нибудь угадав моменты, когда их концентрации могут достичь опасного уровня.

Мероприятия по подбору новых гибридов отечественной и импортной селекции также ничего не дадут – не существует гибридов, устойчивых при интенсивном световом облучении к смеси токсичных соединений выше пороговых концентраций, и при этом сохраняющих высокую урожайность.

Открытие фрамуг и проветривание теплицы может снизить концентрацию фитотоксичных газов до приемлемого уровня. Но во многих регионах России в холодное время года это сделать нельзя из-за высокой опасности переохлаждения верхушек растений и существенных потери тепла, а также большого уноса CO_2 с отточным воздухом. При высоком фоновом содержании загрязнителей, естественно, не произойдет снижения их уровня и в воздухе теплицы.

Умеренно эффективные мероприятия

Не объединять конструкционно или переходами здания и помещения для ГПУ (теплового котла, каталитического модуля очистки) с тепличным блоком; не размещать энергетические установки вблизи теплиц. Не применять даже эпизодически машины с бензиновыми или дизельными двигателями в теплице.

Уменьшение подачи подкормочной газовой смеси (поддержание среднего уровня CO_2 не более 700 ppm), значительно ослабляет повреждения растений от токсикантов, но одновременно тоже ведёт к падению урожайности.

При подкормке растений отходящими газами котельной, никогда не превышайте среднечасовую концентрацию углекислого газа в 1200 ppm (0.12%) даже при самой высокой освещённости.

Систематический контроль над настройкой и работой горелок тепловых котлов, постоянное детектирование содержания после конденсора – не только угарного газа и оксидов азота, но и диоксида серы, в идеале – непредельных углеводородов этилена и пропилена.

Для современных теплиц настоятельно рекомендуется применение группы специальных циркуляционных вентиляторов, создающих равномерное круговое движение воздуха внутри сооружения на малой скорости. Подобное техническое решение способствует рассеиванию воздушных зон с повышенной концентрацией загрязнителей, и обеспечивает равномерную концентрацию всех газов по всему объёму воздуха теплицы («активный микроклимат»). Для этого используются компьютерные программы для расчёта расположения и необходимого количества вентиляторов, а также и направление потока воздуха в каждой точке теплицы. Также данное техническое решение способствует образованию равномерного теплового поля по всей площади сооружения.

Эффективные дорогостоящие мероприятия

Постоянный мониторинг воздуха в теплице позволяет своевременно установить опасность и принять соответствующие меры, однако импортные стационарные газоанализаторы с областью определения концентраций 5-100 ppb чрезвычайно дороги, и требуют высококвалифицированного обращения и регулярного сервисного обслуживания.

Можно значительно уменьшить содержание в окружающей атмосфере вредных для растений соединений. Так, увеличение высоты вытяжных труб у действующих газопоршневых энергоустановок и котельных приводит к существенному снижению фонового содержания токсичных газов в близлежащей местности, но подобное мероприятие сложно технически и организационно. Также высокоэффективным, но весьма капиталозатратным решением для минимизации выбросов оксидов азота в атмосферу, является установка после ГПУ модулей каталитической очистки выхлопных газов по процессу DENOX.

Для минимизации производственного риска, рекомендуется использовать для подкормки светокультуры в условиях России только жидкую углекислоту высшего сорта по ГОСТ 8050-85, поддерживая концентрацию углекислого газа в воздухе теплицы на устойчивом высоком уровне. При высоком содержании CO_2 , вредность токсичных соединений, если они и попадут в теплицу, существенно снизится [2, 9]. Повышение устойчивости растений, связывается с увеличением устьичного сопротивления и затруднением проникновения сопутствующих газов внутрь клетки, изменением скорости дыхания и фотосинтеза [6]. Благодаря сходству физико-химических свойств молекул CO_2 и C_2H_4 , диоксид углерода является естественным биологическим ингибитором действия этилена. Также, при высоком содержании CO_2 в воздухе температурный оптимум фотосинтеза у растений смещается вверх на 1-3°C в зависимости от культуры, сорта и уровня освещённости [7], что частично устраняет проблему перегрева растений в светлое время суток.

Основной трудностью здесь является выбор добросовестного поставщика жидкой низкотемпературной углекислоты. Копиям сертификатов по известным причинам лучше не доверять, а следует настойчиво спрашивать у поставщика свежие результаты анализов из аккредитованных химлабораторий, или регулярно самостоятельно отбирать образцы газа и передавать их на анализ. Рекомендуется выбирать производителей диоксида углерода для пищевых производств, работающих по спецификациям ISBT или EIGA. В случае значительной потребности в CO_2 , для получения собственного высококачественного продукта целесообразно использовать новые модели российских углекислотных станций на твёрдых сорбентах (по процессу VPSA). Современные устройства могут устойчиво работать на отходящих газах газопоршневых установок и тепловых котлов на любых режимах.

Обращайте также внимание на перевозчика жидкой углекислоты, поскольку существует и такой серьёзный источник загрязнения продукта, как мобильная цистерна с остатками предыдущей партии жидкого газа (дренаж), которая может быть низкого качества, с неприемлемым содержанием примесей.

Самым же эффективным мероприятием, причём наименее затратным, следует признать учёт и минимизацию всех вышеописанных рисков ещё на первых стадиях проектирования энергоцентра, котельной и системы подкормки углекислым газом, а не после введения оборудования в эксплуатацию и высадки культуры.

Основная литература

1. CO_2 in de glastuinbouw. – Aalsmeer/Naaldwijk: Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, 1999.
2. Dijk C.J. van, Meinen E., Dueck Th.A. Grenzen voor luchtkwaliteit – Effecten van discontinue blootstelling aan etheen en stikstofoxiden. – Wageningen UR Glastuinbouw, 2011.
3. Vermeulen P.C.M., van der Lans C.J.M. CO_2 dosering in de biologische glastuinbouw. – Wageningen UR Glastuinbouw, 2010.
4. Dueck Th.A., Dijk C.J. van, Kempkes F., van der Zalm T. Emissies uit WKK installaties in de glastuinbouw. – Wageningen UR Glastuinbouw, 2008.
5. Pratt T. An investigation into the effects of flue gas quality on tomato plants. – Agriculture and Horticulture Development Board. – PC287, 2009.
6. Алыков Н.М., Алыков Н.Н., Сютова Е.А. Влияние диоксида серы на содержание фотосинтетических пигментов в растениях. – Астрахань, 2008.

7. Богданов К.Б., Усков Е.И. Способы использования диоксида углерода (CO₂) в агропромышленном комплексе: Обзорная информация. – М.: Агроконсалт, 2005.
8. Глянько А.К., Митанова Н.Б., Степанов А.В. Физиологическая роль оксида азота (NO) у растительных организмов // Журнал стресс-физиологии и биохимии. – 2009. – Вып. 5. – № 3. – С. 34-52.
9. Кособрюхов А.А. Адаптационные изменения фотосинтеза при повышенной концентрации CO₂: Автореф. дис... д-ра биол. наук. – М., 2008.
10. Красиленко Ю.А., Емец А.И., Блюм Я.Б. Функциональная роль оксида азота у растений // Физиология растений. – М.: Наука, 2010. – Т. 57. – № 4. – С. 483-494.
11. Сидоренко Е.С., Харитонашвили Е.В. Роль NO в регуляции растительного метаболизма // Всероссийский журнал научных публикаций. – Биологические и сельскохозяйственные науки. – 2011. – Октябрь. – С. 18-23.
12. «ГН 2.2.5.1313-03. Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003 (ред. от 16.09.2013).
13. «ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.05.2003 (ред. от 12.01.2015).
14. Васфилов С.П. Возможные пути негативного влияния кислых газов на растения // Журнал общей биологии. – 2003. – Т. 64. – № 2. – С. 146-159.