

на 2–3 °С, но это не оказывает существенного влияния на процесс биохимической очистки.

6. Установлены также закономерности изменения рН сточной воды в процессе проведения экспериментов, из которых следует, что специальной корректировки рН подаваемого молочного стока на очистку не требуется.

Результаты экспериментов рекомендуются к использованию для разработки энергосберегающей технологии очистки сточной воды молокоперерабатывающих предприятий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учеб. для вузов / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.

2. Скирдов, И. В. Очистка сточных вод с применением прикрепленной микрофлоры / И. В. Скирдов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 6. – С. 10–12.

3. Фортученко, Л. А. Малогабаритные сооружения для очистки сточных вод пищевых предприятий / Л. А. Фортученко, Г. Г. Линкова // Пищевая промышленность. – 1984. – № 4. – С. 46–47.

4. Ботун, Б. О. Погружные дисковые вращающиеся биофильтры / Б. О. Ботун, Н. Г. Дмитриевский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1975. – № 1. – С. 13–15.

5. Дмитриевский, Н. Г. Использование дисковых биофильтров для очистки сточных вод картофельно-крахмальных заводов / Н. Г. Дмитриевский, Л. В. Кравцун // Сахарная промышленность. – 1976. – № 5. – С. 62–66.

6. Яромский, В. Н. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности / В. Н. Яромский. – Брест: Академия, 2004. – С. 71.

7. Лурье, Ю. Ю. Химический анализ производственных сточных вод / Ю. Ю. Лурье, А. И. Рыбникова. – М.: Химия. – 1974. – 336 с.

Поступила 28.05.2010

УДК 504.53.054

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВЫ СОЕДИНЕНИЯМИ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

*Докт. техн. наук, проф. БУБНОВ В. П., канд. с.-х. наук, доц. БЕЛЬСКАЯ Г. В., асп. МИНЧЕНКО Е. М.*

*Белорусский национальный технический университет*

Хозяйственная деятельность человека предполагает использование различных химических соединений и привнесение их в экосистемы. Химические соединения (природного и антропогенного происхождения) считаются загрязнителями, если они нарушают качественный баланс (равновесие) экосистемы. Это справедливо и в отношении почвенных экосистем. Наряду с непосредственным загрязнением почвенных экосистем хозяйственной деятельностью человека на земле (почве) важной проблемой является переход вредных веществ из атмосферы в почву в виде кислотных дождей, аэрозолей и т. п. Один из основных поставщиков вредных выбросов в атмосферу – сжигание органического топлива на различных энергетических установках [1, 2]. Так, на 1 МВт выработанной электрической энергии ТЭС, работающей на органическом топливе, в атмосферу

выбрасывается окислов азота при сжигании: газа –  $24,32 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/год; мазута –  $18,37 \cdot 10^3$  т/год; угля –  $48,02 \cdot 10^3$  т/год [2].

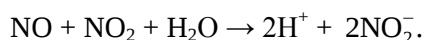
Дымовые газы (выбросы) ТЭС, переходя из атмосферы на земную поверхность, загрязняют почву, растения, что приводит к повреждению и отмиранию растений как путем непосредственных воздушных контактов их зеленых частей с загрязняющими веществами, накопления их в тканях растений, так и под воздействием токсичной среды (почвы, воды), сосредоточивающей вредные ингредиенты выбросов, которые через корневую систему попадают в растения, а затем и в организм животных и человека. Загрязнение почв происходит через непосредственное оседание атмосферных выбросов, смывание токсикантов с растений, поступление с опавшими листьями, ветровым переносом и осадками, что приводит к изменению физи-

ко-химических свойств почв, их плодородия, а также к загрязнению поверхностных и грунтовых вод.

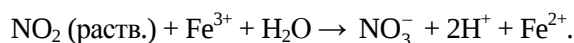
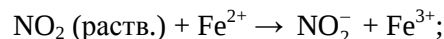
В связи с трансформацией соединений азота в почве следует упомянуть еще одну важную проблему. В число газообразных продуктов, выделяющихся в различных процессах, входит  $N_2O$ . Это соединение участвует в разрушении озонового экрана в стратосфере, от которого зависит существование всех живых организмов на Земле. Главным природным источником  $N_2O$ , поступающего в атмосферу, служит почва, а широкое применение азотных удобрений и вымывание азота в почву в виде атмосферных осадков может увеличить поступление  $N_2O$  в атмосферу. Поэтому знание механизма перехода оксидов и диоксидов азота из атмосферы в почву и обратно в атмосферу позволит более объективно оценить эколого-экономическую обстановку территории при строительстве различных энергоисточников.

Рассмотрим механизм трансформации оксидов азота в атмосфере и последующее их попадание на почву. Удаление оксидов азота из воздуха происходит за счет их растворения в облачной воде, газофазного окисления в воздухе, вымывания осадками и сорбции подстилающей поверхностью.

Одним из основных каналов стока оксидов азота из атмосферы является их растворение и химическая трансформация в нитраты и нитриты в воде, присутствующей в воздухе. Образование нитратов и нитритов в воде может происходить в результате следующих реакций с участием оксидов азота:



Скорость уменьшения оксидов азота за счет взаимодействия с атмосферной водой зависит от действия многих факторов, таких как кислотность дождевых и внутриоблачных капель воды, содержание в них металлов, которые могут катализировать процессы образования нитратов и нитритов [2]:



Процесс удаления оксидов азота из атмосферы в результате жидкофазного окисления можно разделить на две стадии.

На первой стадии, называемой внутриоблачным вымыванием, происходит растворение оксидов азота с последующими химическими реакциями, приводящими к их окислению. На второй стадии (подоблачное вымывание) удаление оксидов азота из атмосферы происходит за счет тех же реакций (сорбции, растворения и окисления), что и при внутриоблачном вымывании, но за существенно короткое время, равное времени падения дождя на поверхность.

Эти две стадии взаимосвязаны, и процессы подоблачного вымывания могут быть эффективными лишь в том случае, если концентрация оксидов азота в воздухе ниже уровня их концентрации внутри облаков. Данное условие выполняется для атмосферы урбанизированных районов, в которой содержание оксидов азота может достигать высоких значений. В этом случае за счет процессов подоблачного вымывания концентрация двуокиси азота в приземном слое воздуха может уменьшиться на 20–70 %.

Механизм распространения и трансформации оксидов азота в атмосфере представлен на рис. 1.

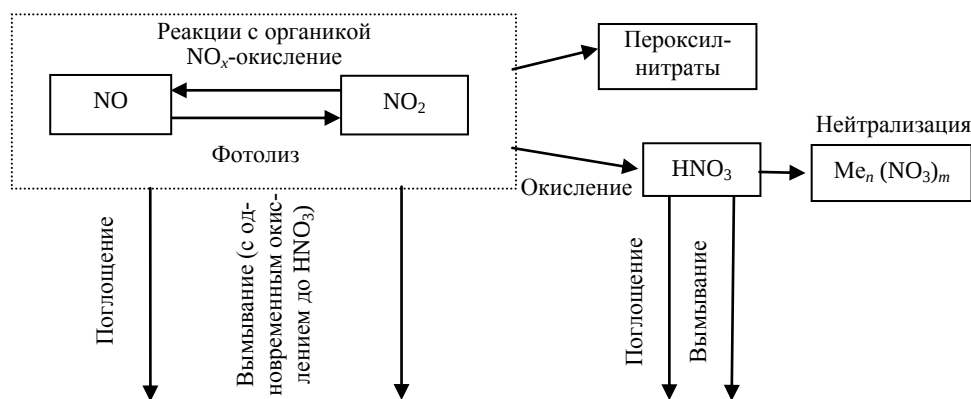


Рис. 1. Механизм образования и трансформации азотной кислоты в атмосфере

Для количественного определения азотной кислоты, поступающей на поверхность почвы, нами используется подход, основанный на учете потоков исходящего вещества из каждого блока схемы (рис. 1) в единицу времени [3], а для пространственного отражения загрязнения – зависимость, учитывающая розу ветров [4]. Полученная математическая модель дает возможность рассчитать количество азотной кислоты, поступающей на поверхность в определенной точке конкретной местности.

Рассмотрим процессы трансформации и аккумуляции соединений азота в почве. Анализируя результаты исследований, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе по азотному режиму почв, можно заключить, что аккумуляция азота в почвах в значительной мере определяется их биохимической активностью и наличием гумуса, хозяйственной деятельностью человека. В разных почвенно-климатических условиях превращение азота в почве имеет свои особенности.

Азот в почвах находится преимущественно в форме органических соединений, и только небольшая его доля (примерно от 1 до 10 % в зависимости от типа почв и содержания гумуса) представлена минеральными соединениями.

Минеральные формы соединений N, кроме аммония, представлены нитратами и нитритами. Нитритов очень мало – десятые доли миллиграмма азота на 1 кг почвы. Кроме того, в газовой фазе обнаруживаются оксиды азота. В доступных растениям минеральных соединениях находится, как правило, 1–3 % от общего количества азота почвы.

Непосредственно доступен азот растениям в форме  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ , частично усваиваются и молекулярные органические соединения, например аминокислоты. Но поскольку доля минеральных соединений азота невелика, то основным резервом азота для питания растений и источником различных трансформационных процессов являются органические соединения.

Практически все группы и фракции органического вещества содержат азот; около 10 % всего азота содержится в виде аминокислот и периферических цепей гумусовых кислот. Близко к этому содержание аммонийного азота почвенного гумуса и несколько ниже содержание азота аминокислот. От 30 до 50 % всего почвенного азота представлено так называемыми негидролизруемыми соединениями: это азот гумусовых кислот, в том числе и азот гетероциклов.

Азот образует разнообразные окислы, в которых принимает валентности, формально равные от +1 до +5; в аммиаке и аммонийных солях он проявляет валентность –3. В почвах присутствуют соединения, в которых азот представлен почти всеми степенями окисления, хотя некоторые из них появляются только как промежуточные продукты в сложной цепи трансформации азотсодержащих соединений.

Обширные литературные данные свидетельствуют о том, что основные процессы, с которыми связано превращение соединений азота почвы и вносимых удобрений, а также его круговорот в системе «атмосфера – почва» теснейшим образом связаны с окислительно-восстановительным состоянием почвенной среды. Основными звеньями превращения азота в почве являются: процессы его поглощения живыми организмами (биологическое поглощение); накопление в форме различных соединений (гумус, растительные и животные остатки); процессы аммонификации, нитрификации и денитрификации; процессы фиксации азота воздуха клубеньковыми и свободноживущими азотфиксирующими микроорганизмами.

Механизм трансформации азота в почве под влиянием антропогенного воздействия представлен следующей схемой (рис. 2).

К наиболее важным циклам превращения азота в почвах в связи с условиями их аэрации, а следовательно, и с особенностями окислительно-восстановительного режима относятся процессы нитрификации и денитрификации. Различают биологическую денитрификацию и хемоденитрификацию. Биологическая денитрификация обусловлена деятельностью денитрифицирующих микроорганизмов. Хемоденитрификация – процесс восстановления нитритов в результате химических реакций.

Антропогенное воздействие на почву с различной интенсивностью обуславливает разную активность процессов гумусообразования и формирования неоднородного качественного (фракционного) состава азота почв. В связи с этим в почвенных профилях разного типа почв аккумулируются различные запасы гумуса, общего азота и его фракций [5].

Как следует из проведенных исследований, механизм перехода вредных веществ из атмосферы в почву представляет собой сложный процесс, исследование которого в натурных и лабораторных условиях вызывает большие затруднения. Поэтому в последние годы эти исследования базируются в основном на использовании методов математического моделирования [6, 7].

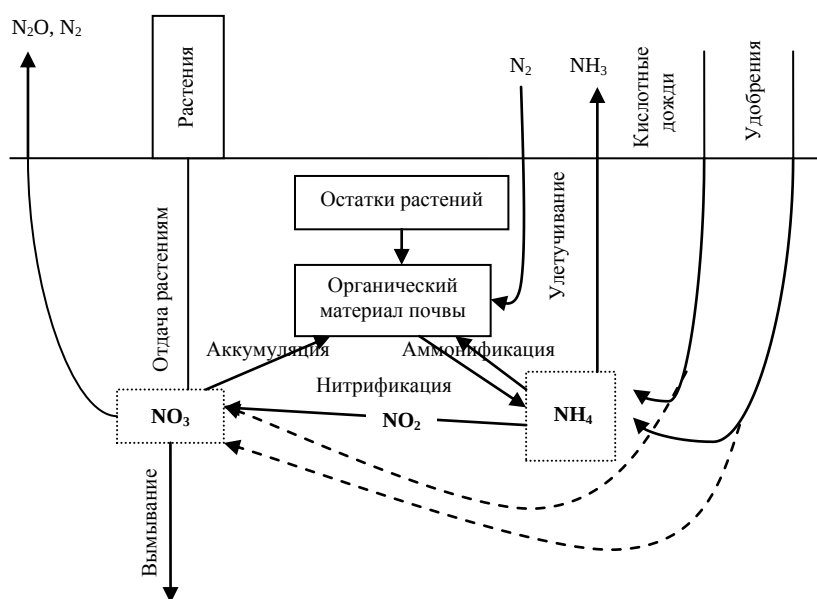


Рис. 2. Механизм поступления и трансформации азота в почве

Общее модельное уравнение миграции соединений азота в почве представим в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p_b S_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\Omega C_i) = \frac{\partial}{\partial t}[\Omega D(\Omega, q) \frac{\partial C_i}{\partial z}] - \frac{\partial}{\partial z}(q C_i) \pm \Sigma \Phi,$$

где  $\frac{\partial}{\partial t}(p_b S_i)$  – время всасывания токсикантов в почвенный раствор;  $\frac{\partial}{\partial t}(\Omega C_i)$  – то же превращения в жидкой фазе почвы;  $\frac{\partial}{\partial t}[\Omega D(\Omega, q) \frac{\partial C_i}{\partial z}]$  – изменения благодаря гидродинамической дисперсии;  $\frac{\partial}{\partial z}(q C_i)$  – конвективный перенос;  $\Sigma \Phi$  – явление перемещения вниз/вверх. По нашему мнению, наиболее удачной программой решения модельного уравнения является компьютерная программа GEO-SLOPE [7].

## ВЫВОДЫ

Соединения азота разной степени окисленности, содержащиеся в выбросах ТЭС, подвергаются процессам трансформации в атмосфере – растворению в облачной воде, газофазному окислению в воздухе, вымыванию осадками и сорбции подстилающей поверхностью почвы. Представлен механизм образования и трансформации соединений азота в атмосфере, а также поступления их в почву. Вымывание азота в почву посредством кислотных осадков (наряду с внесением минеральных азотных удобрений) существенно влияет на процессы его превращения – нитрификацию и денитрификацию.

Учитывая сложность и многофакторность происходящих процессов в атмосфере и почве, предложено модельное уравнение поведения азота в почвах в зависимости от концентрации поступающих соединений, времени их всасывания, особенностей почвенного поглощающего комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бубнов, В. П. Модель прогнозирования загрязнения почв окислами азота при сжигании органического топлива / В. П. Бубнов, Г. В. Бельская, Е. М. Минченко // 3-я Междунар. науч.-практ. конф.: сб. науч. ст.: в 2 ч. / МСХ РБ, БАТУ, редкол. М. Ф. Рыжанков [и др.], Минск, 29–30 мая 2008 г. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 10–12.
2. Ровинский, Ф. Я. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере / Ф. Я. Ровинский, В. И. Егоров. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 185 с.
3. Израэль, Ю. А. Кислотные дожди / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 269 с.
4. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
5. Семененко, Н. Н. Азот в земледелии Беларуси / Н. Н. Семененко, Н. В. Невмержицкий. – Минск: Хата, 1997. – 196 с.
6. Использование методов математического моделирования для определения загрязнения почв / Г. А. Бельская // Наука – образованию, производству, экономике: 50-я Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2007. – Т. 2. – С. 471–478.
7. Yaron, B. Soil Pollution. Processes and Dynamics / B. Yaron, R. Calvet, R. Hrost. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 313 p.

Поступила 10.03.2010