

*Розглянуто хімічні перетворення в атмосфері основних газоподібних продуктів горіння. Встановлено основні шляхи утворення азотної та сірчаної кислот у продуктах горіння. Визначено інтенсивність абсорбції газоподібних продуктів горіння та їх похідних водними краплями атмосферного аерозолю. Розглянута динаміка осадження кислотних аерозолів із атмосфери за рахунок броунівської та гравітаційної коагуляції. Проведено порівняльний аналіз інтенсивності утворення кислотних аерозолів і їх вимивання з атмосфери опадами*

*Ключові слова: хімічно небезпечні речовини, конденсація, ядра конденсації, коагуляція, опади, очищення атмосфери*

*Рассмотрены химические преобразования в атмосфере основных газообразных продуктов горения. Установлены основные пути образования азотной и серной кислот в продуктах горения. Определена интенсивность абсорбции газообразных продуктов горения и их производных водными каплями атмосферного аэрозоля. Рассмотрена динамика осаднения кислотного аэрозоля из атмосферы за счет броуновской и гравитационной коагуляции. Проведен сравнительный анализ интенсивности образования кислотных аэрозолей и их вымывания из атмосферы осадками*

*Ключевые слова: химически опасные вещества, конденсація, ядра конденсації, коагуляція, осадки, очистка атмосфери*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫПАДЕНИЯ КИСЛОТНЫХ ОСАДКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРУПНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПОЖАРОВ

**М. В. Кустов**

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра специальной

химии и химической технологии

Национальный университет

гражданской защиты Украины

ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023

E-mail: maksim\_kustov@mail.ru

## 1. Введение

В результате крупных природных и техногенных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения. За счет движения воздушных масс продукты горения распространяются на десятки километров. По причине больших масштабов зон атмосферных загрязнений локализация и ликвидация последствий техногенных аварий представляет значительные трудности и требует привлечения большого количества сил и средств. Продукты горения состоят из газообразных компонент и твердых аэрозолей сажи и золы. Однако при контакте с составляющими атмосферы некоторые газы, полученные при горении, вступают с ними в реакцию с образованием новых соединений. В то же время в атмосфере происходят естественные процессы самоочищения, основным механизмом которых является вымывание опасных веществ осадками. Интенсивность процесса вымывания определяет время существования химически опасного вещества в атмосфере, а, следовательно, и размеры зоны загрязнения. Исходя из этого, актуальной задачей исследований является численное прогнозирование поведения опасных продуктов горения в атмосфере. Для этого необходимо рассмотреть особенности

образования и выведения из атмосферы газообразных и твердых аэрозольных опасных веществ с учетом метеорологических условий атмосферы и основных параметров пожара.

## 2. Анализ последних достижений и постановка проблемы

В работе [1] достаточно подробно рассмотрены продукты горения основных пород хвойных и лиственных деревьев. Уточняющие результаты экспериментов по составу газообразных продуктов горения древесины приведен в работе [2]. Автор работы [3] рассматривает выбросы продуктов горения бурых и коксующихся углей, которые массово используются в качестве топлива на теплоэлектростанциях. Значительную долю горючих материалов составляет нефть и нефтепродукты, экологические последствия горения которых рассмотрены в работе [4]. Обобщающий анализ состава продуктов горения основных классов горючих веществ проведено в работе [5], где показано, что кроме основных составляющих (CO<sub>2</sub>, сажа, зола) в атмосферу попадает большое количество различных газообразных веществ. Степень

опасности любого химического соединения в атмосфере определяется его среднесуточными предельно допустимыми концентрациями (ПДК<sub>сс</sub>), которые регламентируются нормами в каждой отдельной стране. И если для Украины [6] и Российской Федерации [7] эти нормы схожи то, например, нормирование в США [8] несколько отличается. Различные государственные и международные организации и программы постоянно проводят спутниковый мониторинг химического состава тропосферы, что дает нам возможность оперативно отслеживать критические превышения предельно допустимых концентраций. Наиболее распространёнными являются комплексы MODIS (Искусственный спутник Земли (ИСЗ) Terra, Aqua) [9], OMI (ИСЗ Aura) [10], AIRS (ИСЗ Aqua) [11], которые покрывают все области земного шара. Кроме этого национальные организации по контролю экологической безопасности ежегодно готовят отчеты по состоянию атмосферного воздуха над территорией той или иной страны [12, 13]. При попадании химически опасных веществ (ХОВ) в атмосферу они взаимодействуют и вступают в реакцию с различными веществами в молекулярной, радикальной или ионной формах, а также контактируют с поверхностью жидких и твердых частиц аэрозолей. В работах [14–16] рассмотрены физико-химические процессы, происходящие в атмосфере с оксидами серы, азота и углерода, как основными составляющими продуктов горения при нормальной работе технологического оборудования и транспорта. Кроме того, большой объем данных по физикохимии атмосферы получен в рамках таких международных научно-исследовательских программ как NAOPEX [17], PROPHET 2001 [18], EUROTRAC-1 и EUROTRAC-2 [19], NAMBLEX [20], MINOS [21], TORCH [22] и ряда других. Для изучения физико-химических процессов в атмосфере с оксидами серы, азота и углерода, а также с некоторыми углеводородами, разработаны и широко используются программные комплексы CHEMA-TA 2.0 [23] и RACM2 [24]. Некоторые основные научные достижения в области физикохимии атмосферных дисперсных систем рассмотрены в работе [25].

В работе [26] рассмотрены основные этапы образования кислотных дождей, однако численных оценок динамики данного процесса не сделано. Кроме того в литературе не рассмотрен полный цикл газообразных продуктов горения, начиная с их поступления в атмосферу при реакции горения и до полного осаждения атмосферными осадками.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является установление физико-химических закономерностей химического преобразования некоторых продуктов горения с их последующей конденсацией, а также основные пути очистки атмосферы от образовавшихся опасных вторичных продуктов горения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– определение продуктов реакции в результате химического преобразования первичных газообразных оксидных продуктов горения;

– определение интенсивности абсорбции газообразных продуктов горения и их производных водными каплями атмосферного аэрозоля;

– определение интенсивности коагуляционного роста капель атмосферных осадков в процессе их выпадения.

### 4. Материалы и методы исследования динамики образования кислотных осадков вследствие крупных природных и техногенных пожаров

Основную часть горючего материала при природных и техногенных пожарах составляют растительные целлюлозосодержащие материалы (древесина, трава, торф), а также нефть и нефтепродукты (различные горюче-смазочные материалы). Исходя из этого, в работе рассматриваются продукты горения растительных материалов и нефтепродуктов, которые попадают в нижнюю тропосферу при нормальных условиях и взаимодействуют с компонентами воздуха. Также рассматривается поведение системы при выпадении осадков в виде дождя различной интенсивности.

Исследование динамики образования кислотных осадков и интенсивности их выпадения проводилось с использованием теории математического моделирования рассматриваемых физических процессов, которые решались численно с использованием различных комплексов компьютерного программного обеспечения.

### 5. Результаты исследования динамики образования и выпадения кислотных осадков вследствие крупных природных и техногенных пожаров

Качественный и количественный состав продуктов горения существенно зависит от вида горючего вещества и условий горения (температура, концентрация окислителя). Однако их основными компонентами являются CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, сажа и зола [1–5]. Из этого перечня наибольшей химической активностью обладают CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>. При попадании в атмосферу эти продукты горения реагируют с атмосферными газами. В нижней тропосфере кроме H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> и относительно инертных CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> содержатся высокоактивные радикалы – гидроксильный HO•, гидропероксидный HO<sub>2</sub>• и нитрат-ионы NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [27]. Такие радикалы появляются в атмосфере под действием ультрафиолетового излучения и, следовательно, их концентрация возрастает с высотой, однако за счет своей высокой активности они вносят существенный вклад в химические процессы и в нижней тропосфере. Химически активные составляющие продуктов горения реагируют с радикалами по следующим схемам (1)–(10):





Как видно из реакций (3)–(10), в результате химических преобразований NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> в атмосфере образуются азотная и серная кислоты. Скорость таких преобразований (v) определяется по закону действующих масс:

$$v = k \cdot C_1^{\alpha_1} \cdot C_2^{\alpha_2}, \quad (11)$$

где k – константа скорости реакции; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – концентрации первого и второго реагента; α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> – стехиометрические коэффициенты первого и второго реагента.

Константы скорости реакций (3)–(10) являются справочными величинами, а концентрации NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> можно оценить исходя из вида горючего вещества. Содержание реакционно-активных радикалов существенно зависит от интенсивности ультрафиолетового излучения и в нижней тропосфере (H ≤ 5 км) составляет около (0,5–7) · 10<sup>12</sup> м<sup>-3</sup> [14, 26, 28].

Образованные азотная и серная кислоты в атмосферных условиях являются жидкостями (T<sub>кип</sub>(HNO<sub>3</sub>) = 83 °C, T<sub>кип</sub>(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) = 280 °C), поэтому в атмосфере при определенных условиях они могут конденсироваться. Для оценки возможности протекания процесса конденсации сравним давление насыщенного пара P<sub>0</sub>(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) = 1733 Па с парциальным давлением паров серной кислоты при предельно допустимой концентрации ПДК<sub>сс</sub> = 0,1 мг · м<sup>-3</sup> [29]. Для этого воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$$P_k \cdot V_a = \frac{m_k}{\mu_k} R_0 \cdot T, \quad (12)$$

где P<sub>k</sub> – парциальное давление паров кислоты; V<sub>a</sub> – объем смеси пара и воздуха; m<sub>k</sub> – масса кислоты в воздухе; μ<sub>k</sub> – молярная масса кислоты; R<sub>0</sub> – универсальная газовая постоянная; T – температура окружающей среды.

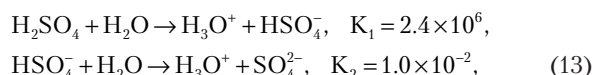
Согласно (12) парциальное давление пара серной кислоты при ПДК<sub>сс</sub> составляет P(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) = 2,27 Па, что более чем в 700 раз меньше давления насыщения, соответственно термодинамической конденсации паров кислот происходить не будет.

Однако в атмосфере даже при низкой влажности содержатся пары воды, которые в реальной атмосфере присутствуют в виде водных кластеров. Азотная и серная кислоты хорошо растворимы в воде в любых концентрациях и поэтому при контакте с водными кластерами образуются аквакомплексы кислот, в которых доминируют водные термодинамические характеристики. Размеры водных кластеров зависят от влажности окружающей среды и в нижней тропосфере с влажностью ~ 50 % и составляет порядка 10 молекул

воды. За счет малых размеров кластеров молекула кислоты в них не диссоциирует на ионы. В таком состоянии водно-кислотные кластеры распространяются в нижней тропосфере или попадают в верхние слои, где образуются осадки.

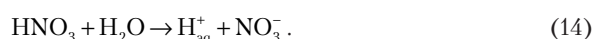
При абсорбции серной и азотной кислот микрокаплями воды проявляются все характерные свойства реакции этих кислот с H<sub>2</sub>O.

Реакция гидратации серной кислоты сильно экзотермическая. Эта реакция протекает с образованием ионов гидроксония:



где HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> – анион бисульфата; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – анион сульфата; K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub> – постоянные кислотной диссоциации.

При взаимодействии азотной кислоты с водой образуется гидратированный ион гидроксония и нитрат-ион:



Процесс диссоциации молекул кислот приводит к более интенсивной диффузии ионов в объеме капли, однако экзотермичность реакции сопровождается повышением температуры капли, вследствие чего идет снижение интенсивности конденсации паров на поверхности капли.

Процесс абсорбции газообразных веществ является сложной физико-химической задачей. При этом существует два различных подхода к построению моделей – кинетическая многослойная модель (kinetic multilayer model for gas-particle (KM-GAP)) [30] и модель симуляции молекулярной динамики (molecular dynamics (MD) simulations) [31, 32]. Модель MD работает на специальной платформе компьютерного расчёта GROMACS с дополнительной настройкой для расчёта абсорбции жидкими аэрозолями TIP4P-Ew. В работе [33] проведен сравнительный анализ таких моделей и получена высокая степень сходимости результатов расчётов.

Результаты расчета динамики абсорбции серной кислоты каплей воды представлены на рис. 1.

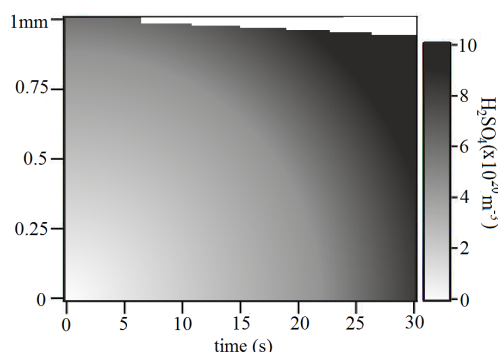


Рис. 1. Динамика абсорбции серной кислоты каплей воды. Вертикальная ось отображает радиальное расстояние от центра капли. Цветовая гамма отображает концентрацию серной кислоты

Результаты моделирования (рис. 1) показывают, что в начальный период наибольшая часть абсорби-

рованных паров кислоты находится на поверхности капли, так как в этой области происходит диссоциация молекул кислоты на ионы, которые, за счет интенсивной диффузии, быстро распределяются по всему объему капли. В дальнейшем концентрация ионов в объеме нарастает и соответствует поверхностной концентрации абсорбированных молекул серной кислоты. Также следует отметить уменьшение размеров капли за счет испарения, которое интенсифицируется экзотермичностью реакции гидратации.

За счет слияния кислот с кластерами и водных кластеров между собой происходит их укрупнение и падение концентрации кислоты, что ведет к образованию микрокапель раствора азотной и серной кислот. При малых размерах микрокапель, когда им соответствует число Кнудсена  $Kn > 1$ , они характеризуются активным Броуновским движением и практически отсутствуют процесса седиментации. За счет Броуновского движения они сталкиваются и коагулируют. При достаточной влажности, когда скорость роста капель за счет коагуляции выше скорости испарения жидкости, происходит укрупнение капель.

Для описания коагуляции таких частиц применима теория коагуляции Смолуховского [34], согласно которой уравнение скорости взаимодействия имеет вид:

$$-\left(\frac{dC}{d\tau}\right) = \epsilon C^2, \tag{15}$$

отсюда:

$$C_\tau = \frac{C_0}{\epsilon\tau C_0 + 1}, \tag{16}$$

где  $C_\tau$  – концентрация взаимодействующих частиц в момент времени  $\tau$ ;  $C_0$  – начальная концентрация взаимодействующих частиц;  $\epsilon$  – константа скорости быстрой коагуляции, которая определяется как:

$$\epsilon = 16\pi \cdot R_k \cdot D_k, \tag{17}$$

где  $R_k, D_k$  – размер и коэффициент диффузии водяного кластера, соответственно.

Коэффициент диффузии определяется из уравнения Эйнштейна:

$$D_k = \frac{kT}{6\pi\mu R_k}, \tag{18}$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха.

С учетом (18) уравнение (17) примет вид:

$$\epsilon = \frac{8kT}{3\mu}. \tag{19}$$

Графический вид скорости коагуляции микрокапель растворов кислот по (16) с учетом (19) представлен на рис. 2. Атмосферные условия – влажность воздуха – 70 %; температура – 0 °С. Размер водного кластера – 1000 Å.

Основным параметром, описывающим процесс испарения капель, является поток массы пара  $J_s$  (кг·с<sup>-1</sup>) от капли в воздух. В реализуемом в нашей ситуации квазистационарном режиме испарения в приближении пограничного слоя он описывается соотношением [35]:

$$J_s = 2\pi \cdot r_d \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_w \cdot P}{R_0 \cdot T} \cdot (Nu_D + 2) \cdot \ln\left(\frac{P - P_{s,a}}{P - P_s(T_d)}\right), \tag{20}$$

где  $P(z)$  – общее атмосферное давление на данной высоте  $z$ ;  $\bar{T}$  – среднее значение абсолютной температуры газовой среды в диффузионном, прилегающем к капле, слое;  $r_0$  – размер капель;  $P_{s,a}$  – парциальное давление водяного пара в атмосфере на данной высоте  $z$ ;  $P_s(T)$  – давления насыщенного пара.

Величина  $Nu_D$  – диффузионный критерий Нуссельта (другое название – критерий Шервуда (Sh)). Он, как и аналогичный по смыслу тепловой критерий Нуссельта ( $Nu_T$ ), оценивается критериальным уравнением [36]:

$$Nu_T = Nu_D = \begin{cases} 2 \cdot (1 + 0.08 \cdot Re^{2/3}), & Re \leq 200, \\ 0.54 \cdot Re^{1/2}, & Re > 200. \end{cases} \tag{21}$$

Здесь критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re = \left| \frac{(w_d - w_a) \cdot 2 \cdot r_d}{v_a} \right|,$$

где  $w_a$  – скорость воздуха;  $v_a$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

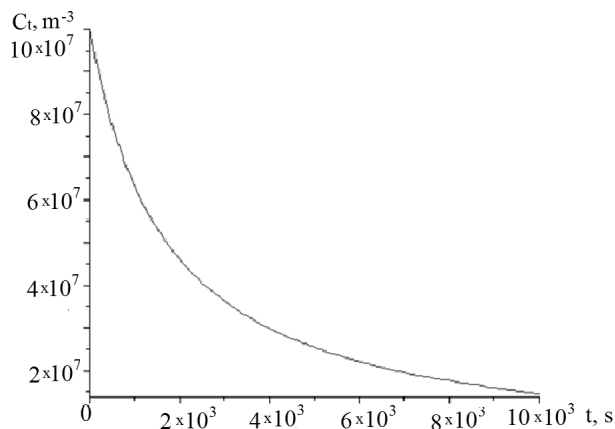


Рис. 2. Скорость коагуляции водно-кислотных кластеров

По мере укрупнения капель начинается гравитационная коагуляция, однако в нижней тропосфере такое возможно лишь при высокой влажности, что приводит к образованию туманов. При этом гравитационная коагуляция играет существенную роль при очистке атмосферы осадками. Этот механизм является основным способом выведения опасных продуктов горения из атмосферы.

Суть механизма гравитационной коагуляции заключается в захвате крупной каплей мелких, при падении. Мелкие капли растворов кислот с радиусом  $r$  и



концентрацией  $n(r)$  под действием воздушных потоков витают в воздухе ( $V_0 \approx 0$ ). Под действием сил тяжести капли осадков размером  $R$  движутся вниз с некоторой скоростью  $V$ . При падении крупной капли ее обтекает поток воздуха, который увлекает за собой мелкие аэрозольные частицы. Однако, поскольку аэрозольные частицы обладают отличной от нуля массой, на них действуют инерционные силы, стремящиеся сохранить прямолинейную траекторию. Вероятность столкновения крупной каплей с мелкой частицей аэрозоля ( $\epsilon_3$ ) зависит от размеров капель и частиц, вязкости среды ( $\eta$ ) и от скорости движения (рис. 3). Описание данного процесса рассмотрено в работах [37–39].

Количество аэрозольных частиц, которые присоединяет к себе одна капля дождя, определяется как:

$$N = \pi \int_0^R \epsilon_3 \cdot (R+r)^2 \cdot V(R) \cdot n(r) dr. \quad (22)$$

Вопросу определения коэффициента захвата  $\epsilon_3$  посвящено множество публикаций различных исследователей [38, 40].

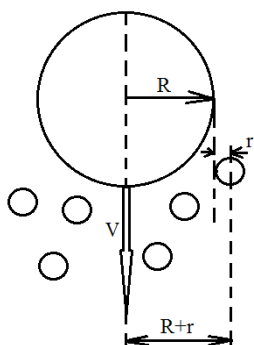


Рис. 3. Схема вымывания жидкого аэрозоля осадками

Основным подходом к определению коэффициента захвата является использование теории подобия, из которой следует, что коэффициент захвата является функцией трех безразмерных величин:

– число Рейнольдса:

$$Re = \frac{2\rho VR}{\eta}, \quad (23)$$

– число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho_k V r^2}{9\eta R}, \quad (24)$$

– число Фруда:

$$Fr = \frac{V^2}{2gR}, \quad (25)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $\rho_k$  – плотность капли дождя,  $g$  – гравитационная постоянная.

При больших числах  $Re$  (турбулентное движение), когда можно не учитывать вязкость воздуха, авторы [38, 40] предложили следующую зависимость, которая многократно проверена:

$$\epsilon_3 = \frac{(Stk)^2}{(Stk + 0,125)^2}. \quad (26)$$

При малых значениях числа  $Re$  (ламинарное движение) велико влияние вязкости воздуха – авторами [38, 40] получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\epsilon_3 = \left(1 + \frac{3}{4} \ln \frac{2Stk}{Stk - 1,214}\right)^{-2}. \quad (27)$$

Для промежуточных режимов течения Ленгмюром предложено коэффициент захвата находить путем интерполяции зависимостей (26) и (27).

Результаты оценочных расчетов эффективности захвата представлены на рис. 4.

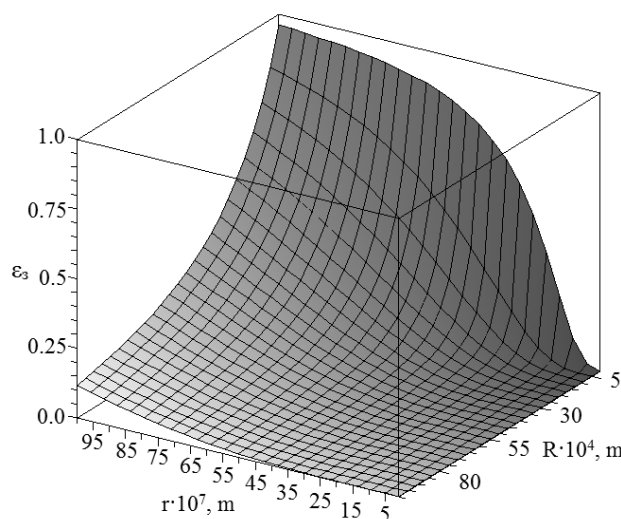


Рис. 4. Зависимость эффективности захвата от размеров капель осадков и аэрозольных частиц

С учетом эффективности захвата, интенсивность вымывания зависит от интенсивности осадков, дисперсности аэрозоля и его концентрации в воздухе (рис. 5).

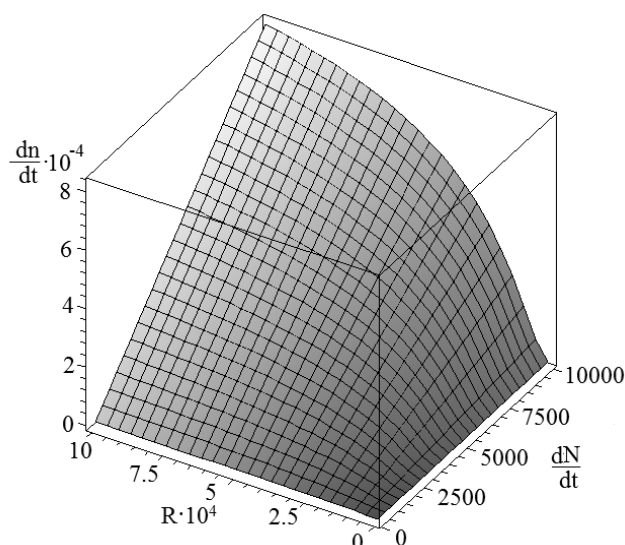


Рис. 5. Зависимость интенсивности вымывания аэрозольных продуктов горения ( $dn/d\tau$ ,  $r=5$  мкм,  $n_0=10^6$ ) от интенсивности осадков ( $R$ ,  $dN/dt$ )

Графическая зависимость (рис. 5) прогнозируемо демонстрирует повышение эффективности вымывания с ростом интенсивности осадков. Однако при этом наблюдается особенность увеличения интенсивности вымывания с ростом дисперсности потока при одинаковой интенсивности осадков, что объясняется увеличением свободной поверхности капель.

## 6. Обсуждение результатов исследования динамики образования и выпадения кислотных осадков вследствие крупных природных и техногенных пожаров

По результатам проведенных в работе исследований необходимо отметить, что процесс очистки атмосферы от газообразных продуктов горения будет зависеть от времени года и суток, так как эти факторы определяют интенсивность солнечного ультрафиолета, который, в свою очередь, непосредственно влияет на концентрацию активных радикалов, участвующих в образовании серной и азотной кислот. За счет диссоциации серной и азотной кислот в воде и их высокой растворимости процесс абсорбции газообразных кислот водными кластерами и каплями воды протекает достаточно быстро, однако за счет их небольшой концентрации в атмосфере процесс очистки при выпадении осадков характеризуется низкой интенсивностью.

Кроме этого, как видно из рис. 2, скорость коагуляции водных кластеров низкая и поэтому их укрупнение будет происходить в основном за счет конденсации на поверхности паров воды при достаточной влажности воздуха. Соответственно, процесс осаждения кислоты из атмосферы начинается с её переноса конвективными потоками в зону осадкообразования, откуда она впоследствии выпадает в виде «кислотных дождей».

Из представленной на рис. 4 зависимости видно, что эффективность захвата частиц падает с увеличением размеров капель. Это связано с тем, что крупные капли создают вокруг себя более мощные обтекающие

потоки воздуха, которые относят мелкие частицы в сторону. Также следует отметить, что в некоторой области мелких аэрозольных частиц зависимость стремится к нулю и видно, что аэрозольные частицы с  $r < 0,1$  мкм с атмосферными осадками практически не контактируют. Вследствие того, что образованные за счет броуновской коагуляции кислотные аэрозоли находятся в пределах 1 мкм, эффективность их вымывания осадками достаточно низкая.

Наибольшей эффективностью очистки атмосферы от газообразных продуктов горения обладают долгосрочные морозящие осадки. При таких осадках капли с малыми размерами имеют большую удельную площадь свободной поверхности. Также, за счет своих размеров, при падении капли мороси создают вокруг себя обтекающие потоки значительно меньшей интенсивности, что приводит к эффективному захвату мелких водных кластеров.

## 7. Выводы

1. Рассмотрена кинетика полного цикла поведения в атмосфере продуктов горения, в результате химических преобразований которых образуются азотная и серная кислоты. Установлено, что скорость образования кислот зависит от времени года и суток, а также от концентрации NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> в продуктах горения.

2. Установлена высокая интенсивность абсорбции серной кислоты каплями осадков за счет её высокой растворимости в воде, а также диссоциации серной кислоты на ионы, что увеличивает интенсивность объемной диффузии. Экзотермичность реакции абсорбции водой кислот приводит к повышенной интенсивности испарения кислотных осадков при выпадении.

3. С помощью моделирования динамики коагуляционного роста капель атмосферных осадков в процессе их выпадения установлена низкая скорость броуновской коагуляции мелких капель, которая увеличивается с ростом размеров капель за счет процесса гравитационной коагуляции.

## Литература

1. Конев, Э. В. Физические основы горения растительных материалов [Текст] / Э. В. Конев. – Новосибирск: Наука СО, 1977. – 237 с.
2. Иличкин, В. С. Термические превращения и токсичность продуктов горения древесины [Текст] / В. С. Иличкин, А. А. Леснович, М. В. Яненко // Обз. инф. – 1990. – № 8. – 67 с.
3. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива [Текст] / И. Я. Сигал. – Л.: Химия, 1988. – 312 с.
4. Сучков, В. П. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами [Текст] / В. П. Сучков, И. Ф. Безродный, А. В. Вязниковцев и др. // Обз. инф.: Сер. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1992. – Вып. 3-4. – 97 с.
5. Кустов, М. В. Химически опасные выбросы в атмосферу при техногенных авариях на предприятиях Украины [Текст] / М. В. Кустов // Безопасность в техносфере. – 2015. – № 3. – С. 16–21.
6. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). ДСП 201-97. Діє від 1997-07-09 [Текст]. – Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 201. – 43 с.
7. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха. СанПиН 2.1.6.575-96. Действует от 1996-01-11 [Текст]. – Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 года № 48. – 21с.
8. The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) [Text] – The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Dec. 14, 2012. – 43 p.
9. MOD04\_L2 [Electronic resource] – Available at: [ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/51/MOD04\\_L2/](ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/51/MOD04_L2/)
10. OMI [Electronic resource] – Available at: [http://eosps.gsf.nasa.gov/eos\\_homepage/for\\_scientists/atbd/docs/OMI/](http://eosps.gsf.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/OMI/)
11. AIRS [Electronic resource] – Available at: [http://eosps.gsf.nasa.gov/eos\\_homepage/for\\_scientists/atbd/docs/AIRS/](http://eosps.gsf.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/AIRS/)

12. Стан довкілля в Україні. Інформаційно-аналітичний огляд [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ecobank.org.ua/GovSystem/EnvironmentState/Reviews/Pages/2009/Ecology\\_Ukraine\\_2009\\_2kv.aspx](http://www.ecobank.org.ua/GovSystem/EnvironmentState/Reviews/Pages/2009/Ecology_Ukraine_2009_2kv.aspx)
13. Advancing the Science of Climate Change [Electronic resource]. – Available at: <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/Science-Report-Brief-final.pdf>
14. Исидоров, В. А. Органическая химия атмосферы [Текст] / В. А. Исидоров. – СПб.: Химиздат, 2001. – 352 с.
15. Ларин, И. К. Химия ночной тропосферы. I. Процессы с участием окислов азота [Текст] / И. К. Ларин // Экологическая химия. – 2011. – № 20 (3). – С. 155–162.
16. Atkinson, R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: a review [Text] / R. Atkinson // Atmospheric Environment. – 2007. – Vol. 41. – P. 200–240. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.068
17. NAOPEX – Nighttime Aerosol/Oxidant Plume Experiment [Electronic resource]. – Available at: <http://www.atmos.anl.gov/>
18. PROPHET 2001 – Program for Research on Oxidants: Photochemistry, Emissions, and Transport [Electronic resource]. – Available at: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/29911.pdf>
19. Transport and chemical transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe [Electronic resource]. – Available at: <http://www.helmholtz-muenchen.de/>
20. Sommariva, R. Nighttime radical chemistry during the NAMBLEX campaign [Text] / R. Sommariva, M. J. Pilling, W. J. Bloss, D. E. Heard, J. D. Lee, Z. L. Fleming et al. // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2007. – Vol. 7, Issue 3. – P. 587–598. doi: 10.5194/acp-7-587-2007
21. Ladstatter-Weissenmayer, A. Transport and build-up of tropospheric trace gases during the MINOS campaign: Comparison of GOME, in situ aircraft measurements and MATCH-MPIC-data [Text] / A. Ladstatter-Weissenmayer, J. Heland, R. Kormann, R. V. Kuhlmann, M. G. Lawrence, J. Meyer-Arneke et al. // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. – 2003. – Vol. 3, Issue 3. – P. 3051–3094. doi: 10.5194/acpd-3-3051-2003
22. Emmerson, K. M. Night-time radical chemistry during the TORCH campaign [Text] / K. M. Emmerson, N. Carslaw // Atmospheric Environment. – 2009. – Vol. 43, Issue 20. – P. 3220–3226. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.03.042
23. CHEMATA 2.0. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.chemata.com>
24. Stockwell, W. R. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling [Text] / W. R. Stockwell, F. Kirchner, M. Kuhn, S. Seefeld // Journal of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102, Issue D22. – P. 25847–25879. doi: 10.1029/97jd00849
25. Алоян, А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере [Текст] / А. Е. Алоян. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
26. Заиков, Г. Е. Кислотные дожди и окружающая среда [Текст] / Г. Е. Заиков, С. А. Маслов, В. Л. Рубайло. – М., Химия, 1991. – 144 с.
27. Carslaw, N. Modeling OH, HO<sub>2</sub> and RO<sub>2</sub> radicals in the marine boundary layer, 2. Mechanism reduction and uncertainty analysis [Text] / N. Carslaw, P. J. Jacoba, M. J. Pilling // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104, Issue D23. – P. 30257–30273. doi: 10.1029/1999jd900782
28. Кондратьев, К. Я. Атмосферный аэрозоль [Текст] / К. Я. Кондратьев, Н. И. Москаленко, Д. В. Поздняков. – Л., Гидрометеоздат, 1987. – 224 с.
29. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). ДСП 201-97. Діє від 1997-07-09 [Текст]. – Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 201. – 43 с.
30. Shiraiwa, M. Kinetic multi-layer model of gas-particle interactions in aerosols and clouds (KM-GAP): linking condensation, evaporation and chemical reactions of organics, oxidants and water [Text] / M. Shiraiwa, C. Pfrang, T. Koop, U. Pöschl // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 12, Issue 5. – P. 2777–2794. doi: 10.5194/acp-12-2777-2012
31. Takaharu, T. Molecular dynamics studies on the condensation coefficient of water [Text] / T. Takaharu, T. Tsuruta, G. Nagayama // The Journal of Physical Chemistry B. – 2004. – Vol. 108, Issue 5. – P. 1736–1743. doi: 10.1021/jp035885q
32. Loudon, P. Molecular dynamics simulations of the condensation coefficient of water [Text] / P. Loudon, R. Schoenborn, C. P. Lawrence // Fluid Phase Equilibria. – 2013. – Vol. 349. – P. 83–86. doi: 10.1016/j.fluid.2013.04.006
33. Julin, J. Mass Accommodation of Water: Bridging the Gap Between Molecular Dynamics Simulations and Kinetic Condensation Models [Text] / J. Julin, M. Shiraiwa, R. Miles, J. P. Reid, U. Pöschl, I. Riipinen // The Journal of Physical Chemistry A. – 2013. – Vol. 117, Issue 2. – P. 410–420. doi: 10.1021/jp310594e
34. Эйнштейн, А. Броуновское движение [Текст]: сб. статей / А. Эйнштейн, М. Смолуховский. – Ленинград: ОНТИ – Главная редакция общетехнической литературы, 1936. – 606 с.
35. Кустов, М. В. Модель процесса испарения атмосферных осадков в воздушной среде в зоне ландшафтных пожаров [Текст] / М. В. Кустов, А. Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности. – 2013. – Вып. 33. – С. 104–112.
36. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике (2-е дополненное и переработанное издание): монография [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий. – Москва: Издательство «Наука», 1967. – 492 с.
37. Матвеев, Л. Т. Физика атмосферы [Текст] / Л. Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 778 с.
38. Ивлев, Л. С. Физика атмосферных аэрозольных систем [Текст] / Л. С. Ивлев, Ю. А. Довгалюк // СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
39. Фукс, Н. А. Успехи механики аэрозолей [Текст] / Н. А. Фукс. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. – 158 с.
40. Волощук, В. М. Кинетическая теория коагуляции [Текст] / В. М. Волощук. – Л.: Гидрометеоздат. – 1984. – 284 с.