

УДК 614.841; 551.515

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ ОСАЖДЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ОСАДКАМИ

Кустов М.В., Рябцев В.Н.

Представлена экспериментальная установка для исследования процессов массообмена в технологических процессах и атмосферных системах. Разработанная установка позволяет исследовать процесс сорбции жидкими аэрозолями газов, паров, пылей и продуктов горения при различных физико-химических свойствах системы. Проведен сравнительный анализ существующих теоретических моделей процесса массообмена с полученными экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* массообмен; абсорбция; продукты горения; экспериментальная установка; критерии подобия; теоретические модели.

(Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.)

**Введение.** При возникновении техногенных аварий в атмосферу выбрасывается большое количество химически опасных веществ, которые за счет движения воздушных масс распространяются на большие расстояния. Если для опасных аэрозольных частиц характерно естественное оседание под действием гравитационных сил, то очищение атмосферы от химически опасных газов происходит в основном за счет осадков. Вопрос кинетики абсорбции газа жидкими аэрозолями является достаточно сложным и многофакторным. На сегодняшний день существует три принципиально разных подхода к решению этой задачи. Эти подходы различаются точностью решения, количеством необходимого расчетного времени, количеством входных данных, и необходимостью предварительных экспериментальных исследований. Для определения адекватности модели при описании процессов массообмена при тех или иных физико-химических свойствах системы необходимо проводить экспериментальные исследования.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Степень опасности любого химического соединения в атмосфере определяется его среднесуточными предельно допустимыми концентрациями (ПДК<sub>сс</sub>) [1 – 5]. Национальные организации по контролю экологической безопасности ежегодно готовят отчеты по состоянию атмосферного воздуха над территорией той или иной страны [6, 7]. При попадании химически опасных веществ (ХОВ) в атмосферу они взаимодействуют и вступают в реакцию с различными веществами в молекулярной, радикальной и ионной форме, а также с поверхностью жидких и твердых частиц аэрозоля. В работах [8 – 11] рассмотрены физико-химические процессы, происходящие в атмосфере с оксидами серы, азота и углероды, как основными составляющими продуктов горения при нормальной работе технологического оборудования и транспорта. Некоторые основные научные положения в области физикохимии атмосферных дисперсных систем рассмотрены А.Е. Алояном в работе [12]. Однако при возникновении техногенных аварий с возникновением пожара (или без него), в атмосферу выбрасывается большое количество аммиака, хлора, сероводорода, галогенводородов, сажи, золы и еще ряд особоопасных веществ [13]. Общие закономерности абсорбции на поверхности жидкости рассматриваются в работах [14, 15]. Среди существующих на сегодняшний день подходов к моделированию процессов массообмена наиболее широкое применение в практической деятельности для проектирования технологических процессов приобрела модель расчета процесса абсорбции с использованием теории подобия и, соответственно, критериальных уравнений [14]. Критерии подобия позволяют учесть большинство физико-химических особенностей процесса абсорбции. Однако конечный вид критериального уравнения определяется для конкретной ситуации на основе большого массива экспериментальных данных и не всегда соответствует другим условиям процесса. Таким образом, метод расчета процесса абсорбции газов с использованием теории подобия является достаточно простым, однако имеет ограничения по области применения и значительную погрешность при варьировании условий процесса абсорбции. Для увеличения точности расчета и повышения универсальности расчетных методов в последнее время широкое распространение приобрели симуляционные модели. При этом существует два различных подхода к построению моделей – кинетическая многослойная модель (kinetic multilayer model for gas–particle (KM-GAP)) [16] и модель симуляции молекулярной динамики

(molecular dynamics (MD) simulations) [17, 18]. И хотя, как и большинство математических моделей в комплексах моделирования КМ-GAP и MD принимаются некоторые допущения, упрощающие расчет, данные модели являются на сегодняшний день наиболее точными методами численного расчета кинетики абсорбции газа жидкостью. Такие расчеты являются достаточно трудоемкими и требуют значительного расчетного времени, специального программного обеспечения и значительного количества входных данных, которые не всегда можно определить. S. Schwartz [19] предложил процесс абсорбции рассматривать как отдельные физико-химические этапы. При этом математические выводы по предложенной модели сделаны с некоторыми упрощениями, что сужает область применения данной модели. Таким образом, единого подхода к экспериментальной проверке существующих моделей не создано, что значительно затрудняет их анализ и не позволяет качественно изучать процесс вымывания загрязняющих веществ атмосферными осадками.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является создание наиболее универсальной методики проведения экспериментальных исследований процесса массообмена для газов, паров, твердых аэрозолей и продуктов горения, а также сравнительный анализ существующих теоретических моделей массообмена на основе полученной экспериментальной методики.

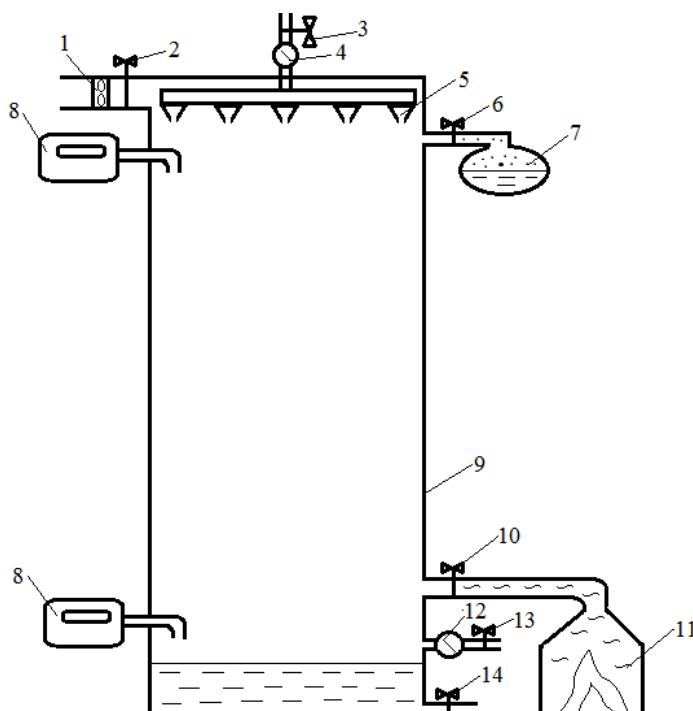
Как уже отмечалось выше, каждый подход к теоретическому моделированию процесса массообмена имеет свои сильные и слабые стороны. В работе [20] проанализированы основные модели расчета процесса абсорбции химически опасных газов аэрозолями. Для целей прогнозирования процесса вымывания ХОВ из атмосферы осадками выбрана и дополнена поэтапная модель расчета абсорбции, которая позволяет упростить расчеты с учетом физико-химических особенностей абсорбции с достаточной степенью точности. Это позволяет сохранить широкую область применения модели и сократить время оперативного прогнозирования. Предложенные дополнения позволяют с достаточной степенью точности рассчитывать коэффициент аккомодации для любого газа с учетом основных поверхностных свойств аэрозоля, а также интенсивность осадков, как функцию концентрации капель и их размеров. Проведен расчетный сравнительный анализ существующих моделей, при этом за эталон выбрана симуляционная MD модель. Анализ показал, что расчеты по поэтапной модели имеют некоторую погрешность относительно симуляционной модели, поэтому для задач масштабного моделирования атмосферных процессов и долгосрочного прогнозирования метеорологической обстановки целесообразней использовать расчетные комплексы КМ-GAP и MD. В то же время при решении задач оперативной очистки атмосферы от химически опасных загрязнений при возникновении аварий, где подобное значение погрешностей не критично, а большую значимость приобретают время расчета и ограниченность в исходных данных целесообразней использовать дополненную поэтапную модель [20]. Однако расчетные комплексы КМ-GAP и MD принимают при вычислениях определенные допущения, что должно вести к некоторой погрешности, поэтому для адекватного сравнительного анализа существующих моделей необходимо проведение экспериментальных исследований. Не смотря на то, что в литературе достаточно много работ с экспериментальными исследованиями процессов массообмена [14, 21 – 23], все экспериментальные методики составляются для конкретного рассматриваемого случая и нет единой методики, позволяющей обобщить полученные данные.

Так как основной задачей экспериментальных исследований является рассмотрение процессов абсорбции в атмосфере, то за основу экспериментальной установки выбран цилиндрический прямоточный абсорбер [24]. Для исследования процесса абсорбции при различных физико-химических условиях корпус камеры выполнен в герметическом исполнении. Схема разработанной установки представлена на рис. 1.

Представленная установка позволяет исследовать процессы очистки атмосферного воздуха жидкостными аэрозолями от загрязняющих газов, паров, пыли и продуктов горения. Корректировка интенсивности дисперсности жидкого аэрозоля (абсорбента) происходит за счет изменения потока жидкости с помощью вентиля 3 и его контроля по расходу меру 4, а также за счет изменения геометрических характеристик и количества съемных форсунок, расположенных в верхней части камеры. Форсунки размещены по всей верхней поверхности камеры и могут заменяться заглушками для снижения интенсивности потока.

Применение форсунок различных геометрических параметров дает возможность обеспечить дисперсность в диапазоне 0,5 – 2 мм. Для подачи в камеру мелкодисперсного жидкостного аэрозоля с размерами капель 0,01 – 0,5 мм в верхней части камеры преду-

смотрен входной патрубок от ультразвукового диспергатора 7, который при различных режимах работы обеспечивает необходимую дисперсность.



1 – вентилятор; 2, 6, 10, 13 – газовые запорные краны; 3, 14 – жидкостные запорные краны; 4 – жидкостный расходомер; 5 – форсунки; 7 – ультразвуковой диспергатор; 8 – газоанализаторы; 9 – корпус; 11 – отсек для горения; 12 – газовый расходомер

**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования процессов массообмена в атмосфере**

Ввод в камеру газов, паров и пыли осуществляется через патрубок 13 в нижней части камеры. Количество поданного газа контролируется расходомером 12. Для исследования процессов абсорбции продуктов горения в установке предусмотрена дополнительная камера сгорания, в которой происходит сжигание необходимого горючего вещества, а продукты горения поступают через патрубок 10 в камеру.

Для идентификации содержания газа и непрерывного контроля изменения его концентрации в камере находятся газоанализаторы 8. Так как газы по объему камеры могут быть распределены не равномерно, то для нахождения среднеобъемной концентрации газоанализаторы расположены в верхней и нижней частях камеры.

Герметичное исполнение корпуса камеры позволяет проводить эксперимент как при установившейся концентрации газа, так и при нестационарном режиме.

Во время проведения эксперимента имеется возможность проводить отбор проб абсорбента для контроля степени его насыщения абсорбентом.

После проведения эксперимента производится очистка объема камеры от остаточных продуктов с помощью вытяжного вентилятора 1.

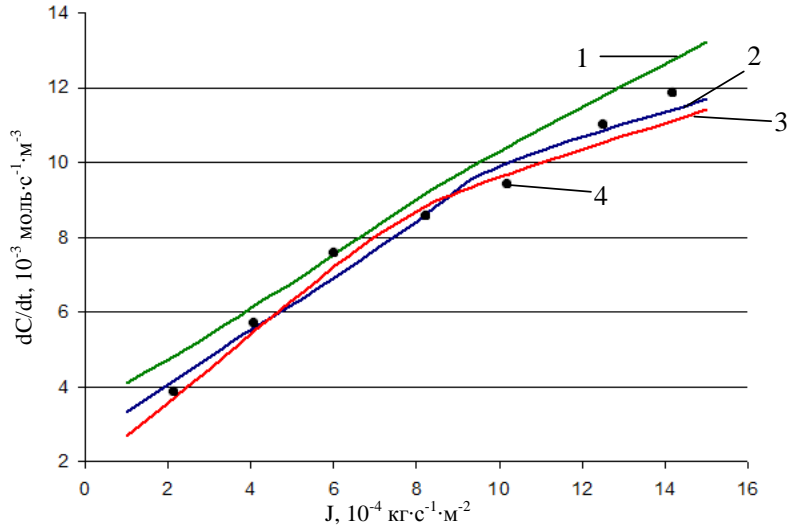
Для сравнительного анализа существующих моделей, проведена серия экспериментов по исследованию влияния интенсивности потока аэрозоля на скорость вымывания аммиака водным аэрозолем. В качестве примера выбран аммиак по причине того, что для этого газа достаточно полно рассмотрены и многократно проверены модели с использованием критериальных уравнений и математических моделей [14, 16 – 18, 25].

Концентрация капель в объеме определялась из соотношения интенсивности потока и их скорости падения:

$$C_{drop} = \frac{J}{v_{drop} \cdot m_{drop}},$$

где  $J$  – интенсивность потока аэрозоля на единицу площади;  $v_{drop}$  – скорость падения капли;  $m_{drop}$  – масса одной капли.

Масса капель определялась из расчета их дисперсности  $r \approx 0,8$  мм, скорость падения выбиралась средняя по объему из расчета высоты камеры  $H = 2$  м. Измерения проводились сериями по три эксперимента, из которых определялось среднее значение. Также необходимо отметить, так как скорость абсорбции от концентрации капель и их размера имеет одинаковую степенную зависимость, а интенсивность осадков разную ( $J \sim C_{drop}$ ,  $J \sim R^3$ ), то при одинаковой интенсивности осадков предпочтительнее мелкодисперсные осадки с большой концентрацией капель. Результаты исследований представлены на рис. 2.



1 – расчет с помощью критериального уравнения; 2 – расчет с помощью дополненной поэтапной модели;  
3 – расчет с помощью симуляционной математической модели MD; 4 – экспериментальные данные

**Рисунок 2 – Зависимость скорости вымывания аммиака водным аэрозолем от интенсивности потока**

Из анализа теоретических и экспериментальных результатов можно сделать вывод, что наибольшей адекватностью описания экспериментальных данных обладает симуляционная модель MD. При этом поэтапная модель (кривая 2) также обладает высокой степенью точности. Не смотря на то, что представленная экспериментальная методика имеет некоторое несоответствие моделируемых физических свойств системы (неравномерность скорости падения капель по высоте, распределение капель по размерам), полученные результаты удовлетворительно согласуются с расчетными (рис. 2) и экспериментальными данными других исследователей [14, 21 – 23]. При этом возможности, представленной в работе, экспериментальной установки позволяют моделировать большинство физико-химических свойств, как системы, так и веществ, которые в ней участвуют.

**Выводы.** С целью изучения динамики процессов сорбции жидкими аэрозолями газов, паров, пылей и продуктов горения при различных физико-химических свойствах системы разработана экспериментальная установка и методика проведения исследований. Возможность реализации широкого спектра физико-химических параметров системы позволяет моделировать процессы массообмена как в промышленных, так и в атмосферных аэрозолях. На примере сорбции аммиака водным аэрозолем проведен сравнительный анализ полученных в работе экспериментальных результатов с существующими теоретическими моделями массообмена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). ДСП 201-97. – [Діє від 1997-07-09]. – Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 201. – 43 с.
2. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. ГОСТ 17.2.3.01-86. – [Действует от 1987-01-01]. – Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 10 ноября 1986 г. № 3359. – 4 с.
3. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов. Вредных веществ промышленными предприятиями. ГОСТ 17.2.3.02-78. – [Действует от 1980-01-01]. – Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 24 августа 1978 г. № 2329. – 15 с.

4. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха. СанПиН 2.1.6.575-96. – [Действует от 1996-01-11]. – Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 года № 48. – 21 с.
5. The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS). – The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Dec. 14, 2012. – 43 p.
6. Стан довкілля в Україні. Інформаційно-аналітичний огляд. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ecobank.org.ua/EnvironmentState/Reviews/Pages/default.aspx>, свободный – Дата доступа: 16.04.2016.
7. Advancing the Science of Climate Change. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/Science-Report-Brief-final.pdf>, свободный – Дата доступа: 18.04.2016.
8. Заиков, Г.Е. Кислотные дожди и окружающая среда / Г.Е. Заиков, С.А. Маслов, В.Л. Рубайло. – М., Химия, 1991. – 144 с.
9. Исидоров, В.А. Органическая химия атмосферы. – СПб., Химиздат, 2001. – 352 с.
10. Ларин, И.К. Химия ночной тропосферы. I. Процессы с участием окислов азота / И.К. Ларин // Экологическая химия. – М., 2011. – № 20(3). – С. 155-162.
11. Atkinson, R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: a review / R. Atkinson // Atmospheric Environment. – 2007. – № 41. – Pp. 200-240.
12. Алоян, А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
13. Кустов, М.В. Химически опасные выбросы в атмосферу при техногенных авариях на предприятиях Украины / М.В. Кустов // Безопасность в техносфере. – М., 2015. – № 3. – С. 16-21.
14. Рамм, В.М. Абсорбция газов. – М., Химия. – 1976. – 656 с.
15. Мчедлов-Петросян М.О. Колоїдна хімія / М.О. Мчедлов-Петросян, В.І. Лебідь, О.М. Глазкова та ін. – Харків: Фоліо, 2005. – 301 с.
16. 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 / M. Shiraiwa, C. Pfrang, T. Koop, U. Pöschl // Atmos. Chem. Phys. – 2012. – № 12. – Pp. 2777-2794.
17. Takaharu, T. Molecular Dynamics Studies on the Condensation Coefficient of Water / T. Tsuruta, G. Nagayama // J. Phys. Chem. B. – 2004. – № 108 (5). – Pp. 1736-1743.
18. Gilde, A. Molecular Dynamics Simulations of Water Transport through Butanol Films / A. Gilde, N. Siladke and C. P. Lawrence // J. Phys. Chem. A. – 2009. – № 113 (30). – Pp. 8586-8590.
19. Schwartz, S.E. Mass-transport considerations pertinent to aqueous phase reactions of gases in liquid-water clouds, in: NATO ASI Ser. –Springer-Verlag, New York. – 1986. – Pp. 415-471.
20. Кустов, М.В., Калугин, В.Д. Прогнозирование интенсивности осаждения газообразных токсичных химических веществ атмосферными осадками / East European Scientific Journal. – Warsaw, 2016. – № 2 (6). – С. 52-58.
21. Li Y. Q. Mass and Thermal Accommodation Coefficients of H<sub>2</sub>O(g) on Liquid Water as a Function of Temperature / Y.Q. Li, P. Davidovits, Q. Shi, J.T. Jayne // J. Phys. Chem. A – 2001. – № 105 (47). – Pp. 10627-10634.
22. Winkler, P.M. Mass and Thermal Accommodation during Gas-Liquid Condensation of Water / P.M. Winkler, A. Vrtala, P. E. Wagner, M. Kulmala and other // Phys. Rev. Lett. – 2004. – № 93. – Pp. 075701-075723.
23. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.henry-law.org/henry-3.0.pdf>, свободный – Дата доступа: 15.04.2016.
24. Пат. № 2 491 982, Российская Федерация, В01D53/18 Прямоточный абсорбер / Демихов С.В. (RU); патентообладатель Демихов С.В. (RU) – № 2012112680/05; заявл. 03.04.2012; опубл. 10.09.2013.
25. Julin, J. Mass Accommodation of Water: Bridging the Gap Between Molecular Dynamics Simulations and Kinetic Condensation Models / J. Julin, M. Shiraiwa, R. Miles, J. P. Reid, U. Pöschl, I. Riipinen // J. Phys. Chem. A – 2013. – № 117. – Pp. 410-420.

## EXPERIMENTAL CHECK OF GASEOUS DANGEROUS CHEMICALS SEDIMENTATION MODELS BY MEANS RAINFALL

**Maksym Kustov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

### **Vitali Rabtsau**

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus », Minsk, Belarus

*Purpose.* The paper is devoted to the experimental study of dynamics of gases sedimentation from the atmosphere by water aerosols.

*Methods.* Using the developed laboratory experimental appliance of mass-exchanged type it was carried out ammonia sedimentation by various dispersion water aerosols.

*Findings.* The developed experimental appliance allows investigating the gases, vapors, dust and products of burning sedimentation speed by various dispersion, chemical composition and intensity of giving liquid aerosols. The comparative analysis of existent theoretical models of mass exchange process with obtained experimental data has been carried out based on the example of ammonia sorption.

*Application field of research.* The obtained experimental data can be used for checking the adequacy of existing and new theoretical models.

*Conclusions.* The assessment of adequacy of the main theoretical methods of gases sedimentation processes modeling is carried out. The main positive and negative qualities of these models are revealed.

*Keywords:* mass exchange; absorption; burning products; experimental appliance; similarity criteria; theoretical models.

(The date of submitting: April 26, 2016)

### REFERENCES

1. Derzhavni sanitarni pravyla ohorony atmosfernogo povitrja naselenyh misc' (vid zabrudnennja himichnyh ta biologichnyh rehovynamy) [State sanitary rules of protection of atmospheric air of settlements (from pollution by chemical and biological substances)] *DSP 201-97*. Affirmed 09.07.1997. The order of the Ministry of health of Ukraine. No. 201. 43 p. (ukr)
2. Okhrana prirody. Atmosfera. Pravila kontrolya kachestva vozdukh naselennykh punktov [Conservation. Atmosphere. Rules of quality control of air of settlements]. *GOST 17.2.3.01-86*. Affirmed 01.01.1987. The resolution of the State committee USSR on standards 10.10.1986. No 3359. 4 p. (rus)
3. Okhrana prirody. Atmosfera. Pravila ustanovleniya dopustimykh vybrosov. Vrednykh veshchestv promyshlennymi predpriyatiyami [Conservation. Atmosphere. Rules of establishing permissible emissions. Harmful substances from industry]. *GOST 17.2.3.02-78*. Affirmed 01.01.1980. The resolution of the State committee USSR on standards 24.08.1978. No 2329. 15 p. (rus)
4. Atmosforny vozdukh i vozdukh zakrytykh pomeshcheniy, sanitarnaya okhrana vozdukh [Atmospheric air and air of the enclosed space, sanitary protection of air]. *SanPiN 2.1.6.575-96*. Affirmed 11.01.1996. The resolution of the State Committee on Sanitary and Epidemiology Surveillance of Russia of 31.11.1996. No 48. 21 p. (rus)
5. The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS). The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 14.12.2012. 43 p.
6. *Stan dovyllja v Ukrai'ni. Informacijno-analitychnyj ogljad* [The state of environment in Ukraine. Information and analytical review], available at <http://www.ecobank.org.ua/EnvironmentState/Reviews/Pages/default.aspx> (accessed : April 10, 2016). (ukr)
7. *Advancing the Science of Climate Change*, available at <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/Science-Report-Brief-final.pdf> (accessed : April 10, 2016).
8. Zaikov G.E., Maslov S.A., Rubajlo V.L. *Kislotnye dozhd i okruzhayushchaya sreda* [Acid rains and environment]. Moscow, Khimiya, 1991. 144 p. (rus)
9. Isidorov V.A. *Organicheskaya khimiya atmosfery* [Organic chemistry of the atmosphere]. SPb., Khimizdat, 2001. 352 p. (rus)
10. Larin I.K. Khimiya nochnoy troposfery. I. Protsessy s uchastiem okislov azota [Chemistry of the night troposphere. I. Processes with participation of nitrogen]. *Ekologicheskaya khimiya*. Moscow, 2011. No. 20 (3). Pp. 155-162. (rus)
11. Atkinson R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*. 2007. No. 41. Pp. 200-240.

12. Aloyan A.E. *Dinamika i kinetika gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere* [Dynamics and kinetics of gas impurity and aerosols in the atmosphere]. Moscow. IVM RAN, 2002. 201 p. (rus)
13. Kustov M.V. *Khimicheski opasnye vybrosy v atmosferu pri tekhnogennykh avariyakh na predpriyatiyakh Ukrainy* [Chemically hazardous emissions in the atmosphere at technogenic accidents at the enterprises of Ukraine]. *Bezopasnost' v tekhnosfere*. Moscow, 2015. No. 3. Pp. 16-21. (rus)
14. Ramm V.M. *Absorbtsiya gazov* [Absorption of gases]. Moscow, Khimiya. 1976. 656 p. (rus)
15. Mchedlov-Petrosjan M.O., Lebid' V.I., Glazkova O.M. *Koloi'dna himija* [Colloid and surface chemistry]. Harkiv: Folio, 2005. 301 p. (ukr)
16. Shiraiwa M., Pfrang C., Koop T., Pöschl U. 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. *Atmos. Chem. Phys*, 2012. No. 12. Pp. 2777-2794.
17. Tsuruta T., Nagayama G. Molecular Dynamics Studies on the Condensation Coefficient of Water. *J. Phys. Chem. B*. 2004. No. 108 (5). Pp. 1736-1743.
18. Gilde A., Siladke N, Lawrence C.P. Molecular Dynamics Simulations of Water Transport through Butanol Films. *J. Phys. Chem. A*, 2009. No. 113 (30). Pp. 8586-8590.
19. Schwartz S.E. *Mass-transport considerations pertinent to aqueous phase reactions of gases in liquid-water clouds*. NATO ASI Ser. Springer-Verlag, New York, 1986. Pp. 415-471.
20. Kustov M.V., Kalugin V.D. Prognozirovanie intensivnosti osazhdeniya gazoobraznykh toksichnykh khimicheskikh veshchestv atmosferynymi osadkami [Forecasting of intensity of sedimentation of gaseous toxic chemicals atmospheric precipitation]. *East European Scientific Journal*, Warsaw, 2016. No. 2 (6). Pp. 52-58. (rus)
21. Li Y.Q., Davidovits P., Shi Q., Jayne J.T. Mass and Thermal Accommodation Coefficients of water (g) on Liquid Water as a Function of Temperature. *J. Phys. Chem. A*, 2001. No. 105 (47). Pp. 10627-10634.
22. Winkler P.M., Vrtala A., Wagner P.E., Kulmala M. Mass and Thermal Accommodation during Gas-Liquid Condensation of Water. *Phys. Rev. Lett.*, 2004. No. 93. Pp. 075701-075723.
23. *Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*, available at <http://www.henrys-law.org/henry-3.0.pdf> (accessed : April 10, 2016).
24. Demikhov S.V. *Pryamotochnyy absorber* [Direct-flow absorber]. Patent No. 2 491 982, Russian Federation, B01D53/18. Patentobladatel' Demikhov S.V. (RU). No. 2012112680/05; zayavl. 03.04.2012. Publ. 10.09.2013. (rus)
25. Julin J., Shiraiwa M., Miles R., Reid J.P., Pöschl U., Riipinen I. Mass Accommodation of Water: Bridging the Gap Between Molecular Dynamics Simulations and Kinetic Condensation Models. *J. Phys. Chem. A*, 2013. No. 117. Pp. 410-420.