

**Казаков Александр Алексеевич**, ведущий инженер 34 отдела Открытого акционерного общества «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, E-mail: post@frpc.secna.ru, т. (3854)301437

**Тамбиев Петр Геннадьевич**, к.т.н., зам. гене-

рального директора ТОО «Научно-производственное предприятие «Интеррин», г. Алматы, Республика Казахстан, пр-кт Абая, 191, тел. (727)3765301. E-mail: interrin@yandex.ru

**Франк Александр Александрович**, ведущий инженер ТОО «Научно-производственное предприятие «Интеррин», г. Алматы, Республика Казахстан,

УДК 544.772.3:519.87

## ИСПАРЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЯХ

О.Б. Кудряшова, А.А. Антонникова, Н.В. Коровина, Б.И. Ворожцов

*В работе рассматривается испарение водных аэрозолей с характерными размерами частиц, порядка единиц микрон и менее в различных внешних условиях (влажности и температуре окружающей среды). Физико-математическая модель испарения учитывает зависимость этого процесса от размера частиц, их физико-химических свойств и параметров окружающей среды. Приводятся экспериментальные результаты, полученные с помощью оптических методов измерений дисперсных параметров и концентрации водных аэрозолей.*

*Ключевые слова: мелкодисперсный водный аэрозоль, распределение частиц по размерам, испарение.*

### ВВЕДЕНИЕ

Аэрозоли на основе воды и водных растворов находят широкое применение при пожаротушении, осаждении дымов и пылей, в медицине (ингаляции, дезинфекция) и т.д. Особенно большой интерес вызывают мелкодисперсные аэрозоли. В частности, при ингаляции наибольший терапевтический эффект оказывают аэрозоли с диаметром частиц, меньше микрометра. При этом важным практическим вопросом является время «жизни» таких аэрозолей, поскольку чем меньше размер капли, тем быстрее она испаряется благодаря более развитому теплообмену с ее поверхности.

Цель данной работы – экспериментальное исследование испарения водных аэрозолей при различных внешних условиях: влажности и температуре окружающей среды. При этом измерялись дисперсные параметры и концентрация капель аэрозоля в зависимости от времени.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований влияния температуры и влажности дисперсной среды на эволюцию параметров жидко-капельного аэрозоля была использована испытательная климатическая камера (рисунок 1).

Создание положительной избыточной

температуры в камере осуществляется при помощи нагрева и вентиляции. В качестве нагревательного элемента выступает электрический калорифер мощностью 4,5 Вт. Воздухообмен в камере осуществляется системой вентиляции на базе канального вентилятора с производительностью 400 м<sup>3</sup>/ч, а также при помощи испарителя системы охлаждения. Измерение и регулирование температуры осуществляется блоком управления систем вентиляции и кондиционирования NED ACE222 с контроллером Siemens RLU2xx.

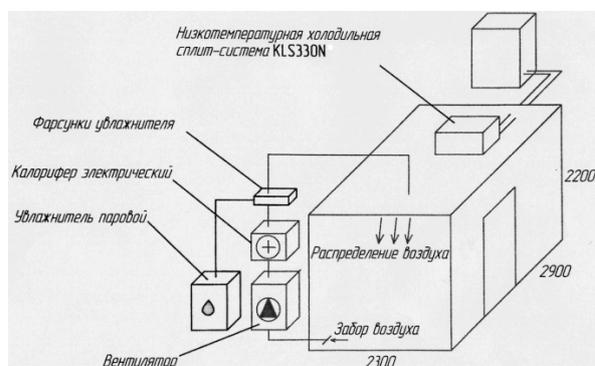


Рисунок 1 – Блок-схема климатической испытательной камеры (размеры на рисунке приведены в мм)

Измерительные датчики расположены в трех точках климатической камеры – на входе и выходе системы вентиляции и на корпусе испарителя системы охлаждения. Повышение влажности до 90 % осуществляется с помощью парового увлажнителя при температуре от плюс 20 до плюс 25 градусов Цельсия.

Для создания жидко-капельного аэрозоля использовался краскопульт КРАТОН R 200 LVLP-02S, настроенный на заданные нами характеристики (средний размер частиц около 9 мкм). Распыляемое вещество для создания жидко-капельного аэрозоля – дистиллированная вода. В ходе проведения экспериментов камера заполнялась аэрозолем в течение 1 минуты (масса распыленной жидкости, таким образом, составила 20 г).

Измерения дисперсных характеристик и концентрации частиц аэрозолей в динамике проводилось с помощью специального измерительного комплекса, основанного на применении оптических методов измерений (метода спектральной прозрачности и малоуглового рассеяния) [1, 2].

#### Физико-математическая модель

Физико-математическая модель основана на следующих положениях. Поток влаги с поверхности капли зависит от ее радиуса и парциального давления паров над ее поверхностью (уравнение Максвелла); температуру капли считаем равной температуре окружающей среды; парциальное давление насыщенного пара подчиняется уравнению Клапейрона-Клаузиуса. Тогда уравнение для скорости изменения диаметра капли [3]:

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{D_f MD}{2\rho_{жс} RT} 2338,8 \times \exp\left(\frac{MH}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right) \left(\frac{4\sigma M}{e\rho_{жс} RT D} - \nu\right), \quad (1)$$

где  $D_f$  – коэффициент диффузии,  $r$  – радиус капли,  $R$  – газовая постоянная,  $M$  – молекулярный вес,  $T$  – температура,  $H$  – теплота фазового перехода,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости,  $\nu$  – влажность среды.

Реальные аэрозоли практически никогда не бывают монодисперсными. Для природных аэрозолей, так же как и полученных в лабораторных условиях, распределение частиц по размерам можно описывать с помощью функции гамма-распределения:

$$f(D) = aD^\alpha \exp(-bD), \quad (2)$$

где параметры  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  – положительные вещественные числа. В качестве одной из важнейших статистических характеристик распределения (2) можно считать объемно-поверхностный диаметр частиц  $D_{32}$ , равный отношению  $(\alpha+1)/b$ . Задавая начальное распределение из эксперимента, с помощью уравнения (1) для каждой фракции можно рассчитать изменение диаметра во времени, а значит, уменьшение общей массы аэрозоля и новый вид функции распределения и ее характеристик (в частности,  $D_{32}$ ).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунках 2-4 приведены зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц  $D_{32}(a)$  и относительной концентрации (б) водного аэрозоля при различных значениях влажности и температуры окружающей среды. В таблице 1 сведены значения времени испарения аэрозоля, посчитанные теоретически согласно приведенной выше модели и определенные экспериментально. Для сравнения отметим, что для испарения 20 г воды в недиспергированном состоянии при тех же условиях требуется время, измеряемое десятками часов.

Как следует из полученных результатов, с понижением температуры и ростом влажности, даже в небольших пределах, время испарения мелкодисперсного аэрозоля уменьшается в несколько раз. Дисперсный состав аэрозоля в опытах и в расчетах менялся незначительно. При увеличении скорости испарения (в экспериментах с более высокой температурой и пониженной влажностью) расчетная концентрация уменьшается практически по линейному закону. В опытах с повышенной влажностью и низкой температурой наблюдается больший разброс экспериментальных значений, что можно объяснить влиянием влажности на точность измерений (запотевание оптических элементов). В целом можно говорить об удовлетворительном согласии теоретических результатов с экспериментальными.

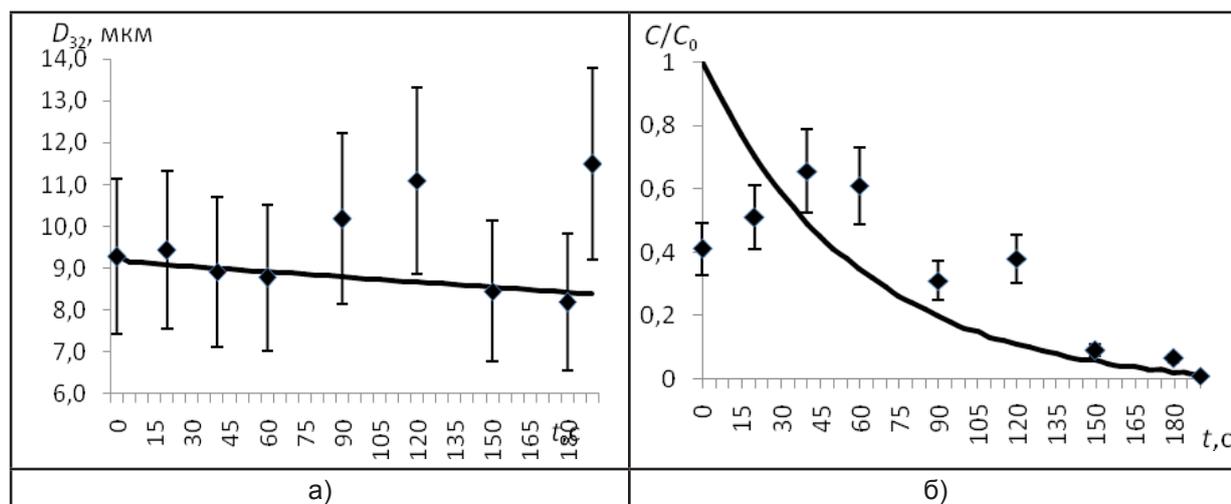


Рисунок 2 – Динамика среднего объемно-поверхностного диаметра (а) и относительной концентрации (б) водного аэрозоля при влажности 90 % и температуре 15°С

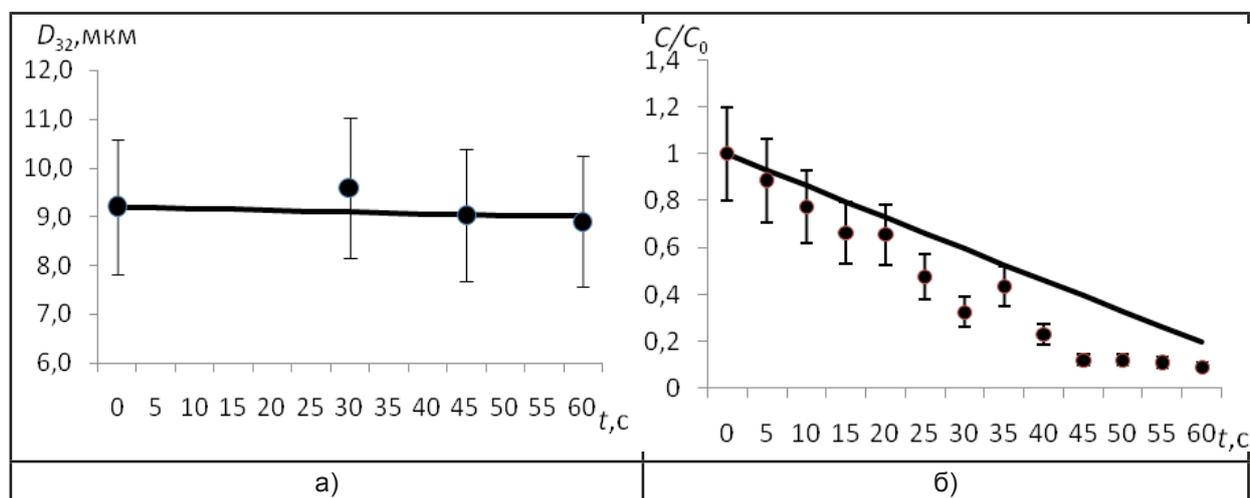


Рисунок 3 – Динамика среднего объемно-поверхностного диаметра (а) и относительной концентрации (б) водного аэрозоля при влажности 70 % и температуре 45°С

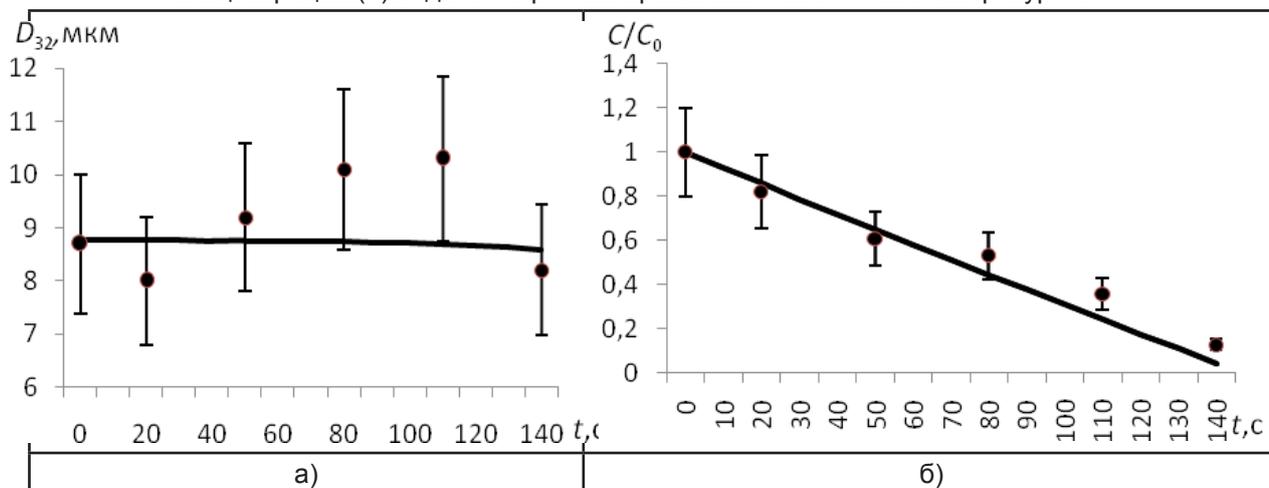


Рисунок 4 – Динамика среднего объемно-поверхностного диаметра (а) и относительной концентрации (б) водного аэрозоля при влажности 60 % и температуре 22°С

Таблица 1 – Время полного испарения аэрозоля в зависимости от влажности и температуры среды

Влажность, %	Температура, °С	Время испарения, с	
		эксперимент	расчет
70	45	60	75
60	22	170	150
90	15	190	190

Таким образом, в работе проведено исследование испарения мелкодисперсных водных аэрозолей, с характерным диаметром частиц, порядка единиц микрометров. Показано, что с ростом влажности и понижением температуры время испарения капель аэрозоля увеличивается в несколько раз. Предложенная физико-математическая модель испарения полидисперсного водного аэрозоля, учитывающая ускорение тепломассопереноса с более развитой поверхности капель, удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko A., Kudryashova O., Vorozhtsov B., Titov S., Akhmadeev I., Muravlev E. Modified Method of Optical Diagnostics of Aerosol Media // <http://www.pim-journal.org/paperInfo.aspx?ID=12>. – Precision Instrument and Mechanology. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – ID12.
2. Пат. 2441218 RU, МКИ G01N 15/02. Способ определения дисперсности и концентрации частиц в аэрозольном облаке / В.А. Архипов, А.А. Павленко, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова, С.С. Бондарчук. – № 2010143653; заявлено 25.10.2010; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 10 с.
3. А.А. Антонникова, Н.В. Коровина, О.Б. Кудряшова, И.М. Васенин. Физико-математическая

модель испарения капель мелкодисперсных аэрозолей // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 129-132.

**Антонникова Александра Александровна**, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: antonnikova.a@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

**Коровина Наталья Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: korovina.nata@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

**Кудряшова Ольга Борисовна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: olgakudr@inbox.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

**Ворожцов Борис Иванович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: olgakudr@inbox.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-58-65.

УДК 544.772.3:519.87

## ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЫЛЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА НА ЭВОЛЮЦИЮ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ

О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, А.А. Антонникова, Б.И. Ворожцов

*Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию эволюции дисперсных параметров и концентрации аэрозолей с характерными размерами частиц (порядка единиц, десятков микрометров и менее) и влиянию физико-химических свойств вещества на процессы испарения и осаждения частиц. Физико-математическая модель учитывает процессы седиментации, испарения, коагуляции частиц (на основе балансовых уравнений Смолуховского). Приводятся экспериментальные результаты, полученные с помощью оптических методов измерений дисперсных и концентрационных характеристик аэрозолей.*

*Ключевые слова: мелкодисперсный аэрозоль, гамма-распределение, модель Смолуховского.*