

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тахчиди Х.П., Чеглаков В.Ю. Дренажи в хирургии рефрактерной хирургии // Рефракционная хирургия и офтальмология. – 2009. – Т. 9. – № 3. – С. 11–15.
2. Чеглаков Ю.А. Эффективность глубокой склерэктомии с эксплантодренированием в лечении поствоспалительной и посттравматической глаукомы // Офтальмохирургия. – 1989. – № 3–4. – С. 34–38.
3. Паштаев Н.П., Горбунова Н.Ю. Отдаленные результаты применения сетчатого дренажа из дигеля в хирургическом лечении рефрактерных глауком // Офтальмохирургия. – 2006. – № 2. – С. 11–15.
4. Сапрыкин П.И., Рязанцева Т.В. Эксплантодренирование в хирургии вторичной глаукомы // Офтальмохирургия. – 1995. – № 3. – С. 22–25.
5. Флеров Г.Н. Синтез сверхтяжелых элементов и применение методов ядерной физики в смежных областях // Вестник АН СССР. – 1984. – № 4. – С. 35–48.
6. Рязанцева Т.В. Эксплантодренирование ядерной мембраной в хирургии некоторых форм вторичной глаукомы (клинико-экспериментальное исследование): дис. ... канд. мед. наук. – Самара, 1996. – 120 с.
7. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Гильман А.Б. Модификация свойств полимерных мембран под воздействием низкотемпературной плазмы // Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43. – № 3. – С. 227–234.
8. Dmitriev S.N., Kravets L.I., Sleptsov V.V. Modification of track membrane structure by plasma etching // Nucl. Instr. and Meth. B. – 1998. – V. 142. – № 1–2. – P. 43–49.
9. Мулдер М. Введение в мембранную технологию / Пер. с англ. под ред. Ю.П. Ямпольского, В.П. Дубяги. – М.: Мир, 1999. – 513 с.
10. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. – М.: Иностран. лит-ра, 1963. – 590 с.
11. Национальное руководство по офтальмологии / под ред. С.Э. Аветисова, Е.А. Егорова, Л.К. Мошетовой, В.В. Нероева, Х.П. Тахчиди. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 940 с.
12. Kravets L.I., Dmitriev S.N., Sleptsov V.V., Elinson V.M. Production of asymmetric track membranes by gas-discharge method // Surf. Coat. Technol. – 2003. – V. 174–175. – P. 821–825.
13. Чалых А.Е., Петрова И.И., Василенко Ж.Г., Герасимов В.И., Брусенцова В.Г. Применение метода газоразрядного травления для изучения структуры кристаллических полимеров // Высокомолекулярные соединения. – 1974. – Т. 16А. – № 6. – С. 1289–1295.
14. Kamath S., Bhattacharyya D., Padukudru C., Timmons R.B., Tang L. Surface chemistry influences implant-mediated host tissue responses // J. Biomed. Mater. Res. Part A. – 2008. – V. 86. – № 3. – P. 617–626.

Поступила 10.11.2011 г.

УДК 62-729.3/.-732:629.63.6:66.046.1

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ И ПОДОГРЕВА ТОПЛИВА В МОБИЛЬНЫХ МАШИНАХ

Э.И. Удлер, П.В. Исаенко, Д.В. Халтурин, А.В. Лысунец

Томский государственный архитектурно-строительный университет  
E-mail: dmitriihalturin@mail.ru

*Предложены методы расчета системы подогрева и очистки топлива в топливных системах машин с дизельными двигателями. Адекватность теоретических представлений показана на примере конструкции фильтра для очистки и подогрева топлива в процессе эксплуатации машины при низких температурах.*

### Ключевые слова:

*Дизельное топливо, эффективность очистки, фильтрация, подогрев.*

### Key words:

*Diesel fuel, efficiency of purifying, filtration, heating.*

Значительная часть современных мобильных машин оснащена двигателями, работающими на дизельном топливе. Для обеспечения требуемой чистоты по ГОСТ 305-87 стандартная топливная система машины имеет двух-, а иногда и трехступенчатую очистку с помощью последовательно установленных фильтров грубой (ФГО) и тонкой (ФТО) очистки. Однако на практике работоспособность машин зачастую нарушается из-за прекращения подачи топлива, вплоть до полной остановки машины. Характерной особенностью отказов, особенно в условиях пониженных температур, является изнашивание прецизионных деталей топливной системы вследствие проникновения в зазоры трущихся пар абразивных частиц и воды, циркулирующих с топливом [1–3].

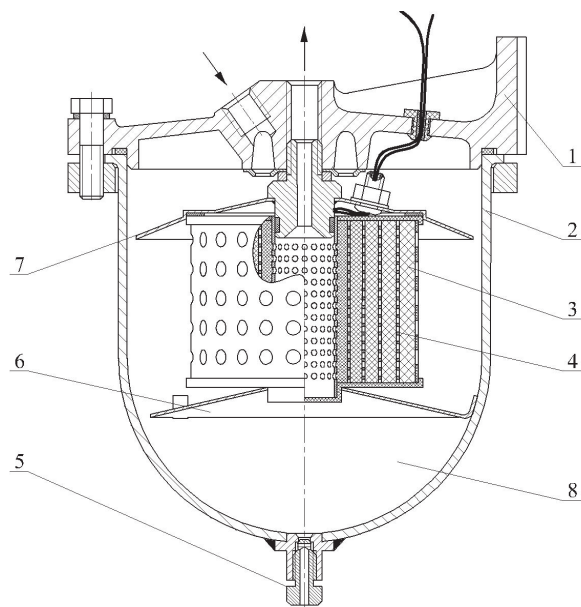
Процесс изнашивания интенсифицируется при эксплуатации машин, не имеющих в топливной системе смесителей-подогревателей (как в иных машинах северного исполнения), но работающих в условиях низких температур. В этом случае происходит парафинизация топлива и образование в нем кристаллов льда, блокирующих поровую структуру ФТО. Вывод очевиден: защита топливной системы с помощью фильтров в штатном исполнении от изнашивания недостаточно эффективна [2].

Специалисты считают, чтобы решить существующую проблему, необходимо совершенствовать топливную систему машин путем замены агрегатов очистки топлива на другие, конструктивно отличающиеся от типовых, либо модернизировать

существующие. Предлагается множество образцов, защищенных патентами. Однако по ряду причин, в том числе и из-за технической сложности, ни один из них не нашел широкого применения [1, 3, 4].

Заслуживает внимания образец двухфункционального фильтра [5], имеющий стержень, на который спирально намотана фильтровальная лента и нагревательный элемент. Фильтровальная лента выполнена с краевыми U-образными выступами и уложена определённым образом, что позволяет разграничить объёмы очищенной и неочищенной жидкостей. Такая конструкция обеспечивает полное использование поверхности фильтроэлемента и позволяет получить достаточную очистку от механических примесей, а также упрощается конструкция и уменьшается материалоемкость, что делает данную конструкцию по технической сущности наиболее близкой к рассматриваемой далее разработке. Однако его недостатком является невысокий ресурс работы по сравнению с объёмными фильтроэлементами из-за отсутствия организованного порового пространства [6].

Целью настоящей работы являлась теоретическая оценка эффективности модернизированного типового топливного фильтра-отстойника мобильной машины (рис. 1). Модернизация заключается в установке в корпусе штатного фильтра разработанного двухфункционального термостабильного фильтроэлемента объёмного типа [7] с заданными размерами пор, уменьшающимися по ходу топлива в организованном поровом пространстве.



**Рис. 1.** Модернизированный фильтр грубой очистки топлива: 1) крышка корпуса фильтра; 2) корпус фильтра; 3) фильтроэлемент объёмного типа [7]; 4) нагревательный элемент; 5) сливная пробка; 6) успокоитель; 7) отражатель; 8) отстойная зона

В качестве фильтрующего материала может быть применен синтетический пористый деформируемый материал, например по ТУ 8397-001-05204776-01, навиваемый вместе с электропроводной подлож-

кой, выполняющей роль нагревателя, на перфорированную трубку.

Намотка пористой ленты с постепенным уменьшением уплотнения позволяет получить фильтрующий элемент с пористостью, увеличивающейся от  $\Psi_{\min}$  (в областях прилегающих к каркасу) до  $\Psi_0$  (на периферии элемента). В процессе очистки жидкость последовательно проходит от периферии к центру. Задержка частиц больших размеров осуществляется в областях, близких к периферии, меньших размеров – в слоях меньшей пористостью. Подобная структура фильтрующего материала позволяет обеспечить равномерную забивку частицами загрязнений и повысить ресурс его работы.

Одним из параметров, оценивающих эффективность фильтров, является тонкость фильтрации жидкости.

Исследования изменения тонкости фильтрации топлива от степени обжатия  $n$ , например, иглопробивного нетканого материала показали, что она удовлетворительно описывается эмпирической зависимостью вида [6]:

$$d_{0,95} = 5,134 \sqrt{\frac{K_0}{n[1 - (1 - \Psi_0)n]}}, \quad (1)$$

где  $d_{0,95}$  – размер частиц загрязнений, 95 % которых задерживается фильтрующим элементом;  $K_0$  – коэффициент проницаемости исходного материала фильтра;  $\Psi_0$  – начальная пористость исходного материала.

Связь между пористостью фильтрующего материала в свободном состоянии  $\Psi_0$  и обжатого в  $n$  раз до  $\Psi_{\min}$  определяется зависимостью

$$\Psi_{\min} = 1 - (1 - \Psi_0)n,$$

где  $\Psi_{\min}$  – минимальная требуемая пористость фильтровального материала на трубке, обеспечивающая требуемое качество очистки фильтруемой жидкости.

Длина фильтровальной ленты  $L$  определяется по формуле, полученной в [7] исходя из способа намотки ленты по закону логарифмической спирали:

$$L = \frac{\pi(r_n - r_0)^2}{\delta} \left( \frac{2 - (\Psi_0 + \Psi_{\min})}{2(1 - \Psi_0)} \right),$$

где  $r_n, r_0$  – соответственно, наружный и внутренний радиусы фильтроэлемента, м;  $\delta$  – толщина пластины фильтроматериала.

Немаловажную роль в оценке эффективности фильтроэлементов играют их гидравлические свойства. Оценка сводится к нахождению и анализу соответствующей зависимости между гидравлическим сопротивлением материала и физическими параметрами фильтроэлемента, степенью обжатия материала и свойствами фильтрующей жидкости [6].

Пренебрегая гидравлическим сопротивлением перфорированной подложки, спиральную ленту фильтроматериала рассматриваем как цилиндрическую сплошную, с уменьшающейся к центру пористостью и проницаемостью за счет управляемого обжатия при изготовлении.

Закон Дарси для цилиндрических фильтров имеет вид

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dr}, \quad v = v_n \frac{r_n}{r}, \quad (2)$$

где  $v$  – текущая по толщине скорость фильтрования в перегородке;  $K$  – коэффициент проницаемости пористого материала;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $P$  – давление;  $r$  – радиус фильтроэлемента.

Для цилиндра с постоянным коэффициентом проницаемости  $K$  решение уравнения Дарси известно [8]. В нашем случае  $K$  зависит от радиуса  $r$ .

Для деформируемых пористых материалов (пенополиуретан, войлок, минеральные волокна и др.) коэффициент проницаемости при обжатии уменьшается обратно пропорционально степени обжатия  $n$  от начального  $K_0$ :

$$K = \frac{K_0}{n}. \quad (3)$$

При технологически реальном способе формирования рассматриваемого цилиндрического фильтра переменную по радиусу условного цилиндра, степень обжатия можно аппроксимировать формулой описывающей линейное уменьшение пористости и проницаемости фильтровальной ленты через степень обжатия в каждом сечении по радиусу  $r$ :

$$n = n_e - x \frac{(r - r_e)}{(r_n - r_e)}, \quad (4)$$

где  $n_e$  – требуемая степень обжатия первого (внутреннего) слоя фильтроматериала, обеспечивающая требуемую тонкость очистки и соответствующую минимальную проницаемость материала на выходе  $K_{\min}$ ;  $x$  – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности в (4) находим из граничного условия:  $n=1$  при  $r=r_e$ , т.е.  $x=n_e-1$ . Тогда:

$$n = n_e - (n_e - 1) \frac{(r - r_e)}{(r_n - r_e)}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (2) с учетом (3) и разделяя переменные, имеем:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{v_n r_n \mu}{r} \frac{\left[ n_e - (n_e - 1) \frac{(r - r_e)}{(r_n - r_e)} \right]}{K_0}, \quad (6)$$

где  $v_n$  – скорость потока на огибающей поверхности фильтра.

Интегрируя (6) в границах схемы на рис. 2, получаем формулу для расчета перепада давления топлива при прохождении через поры фильтрующего материала:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P_n - P_e) = \\ &= \frac{v_n r_n \mu}{K_0} \left\{ n_e \ln \left( \frac{r_n}{r_e} \right) - (n_e - 1) \left[ 1 - \frac{r_e}{(r_n - r_e)} \ln \left( \frac{r_n}{r_e} \right) \right] \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

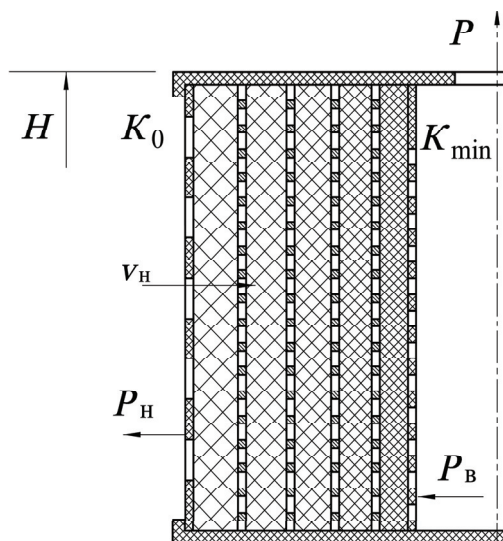


Рис. 2. Схема фильтроэлемента для расчета параметров

Выражая скорость потока на огибающей поверхности фильтра через расход топлива  $V$  на его высоте  $H$ :

$$v_n = \frac{V}{2\pi r_n H},$$

а также динамическую вязкость через кинематическую  $\nu$  и плотность жидкости (топлива)  $\rho$ :

$$\mu = \nu \rho,$$

преобразуя (7), получаем формулу гидравлической характеристики фильтра с учетом конструкции и всех основных факторов:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P_n - P_e) = \\ &= \frac{V \nu \rho}{2\pi K_0 H} \left\{ n_e \ln \left( \frac{r_n}{r_e} \right) - (n_e - 1) \left[ 1 - \frac{\ln \left( \frac{r_n}{r_e} \right)}{\left( \frac{r_n}{r_e} - 1 \right)} \right] \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Теоретические предпосылки перепада давления топлива, рассчитанные по представленной математической модели, подтверждаются результатами эксплуатационных испытаний модернизированного образца ФГО при различных степенях обжатия  $n_e$  (рис. 3).

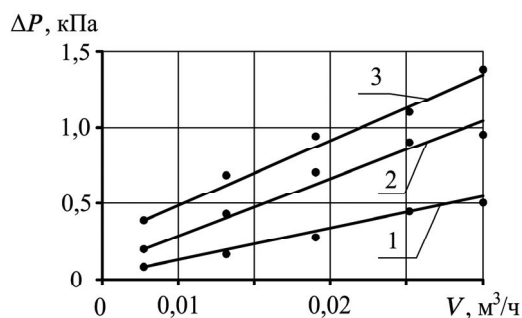
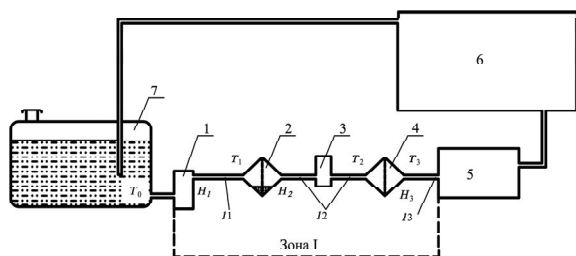


Рис. 3. Характер изменения перепада давления топлива на фильтроэлементах от расхода топлива при  $n_e$ : 1) 2; 2) 3; 3) 3,5; точки – опытные данные; кривая – расчетные значения по формуле (8)

Ниже представлены теоретические предпосылки процесса нагрева топлива в элементах топливной системы машин, которые сводятся к оценке изменения температур  $T_1$  на входе в ФГО и  $T_2$  на входе в ФТО (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема модернизированной системы топливоподдачи: 1) смеситель; 2) модернизированный ФГО; 3) топливоподкачивающий насос; 4) ФТО; 5) топливный насос высокого давления; 6) двигатель; 7) топливный бак;  $I_1, I_2, I_3$  – соединительные трубопроводы;  $H_1, H_2, H_3$  – нагреватели

Для машин, имеющих штатный смеситель-подогреватель на выходе из топливного бака и модернизированный ФГО, процесс нагрева топлива на участке от выхода из бака до входа в ФГО может быть представлен уравнением теплового баланса в элементарной форме:

$$dQ_1 = dQ_{T_1} + dQ_{F_1} + dQ_{V_1}, \quad (9)$$

где  $dQ_1 = P_1 d\tau$  – тепло, поступившее от нагревателя  $H_1$ ;  $P_1$  – мощность нагревателя  $H_1$ ;  $dQ_{T_1} = qic_T(T_1 - T_0)d\tau$  – тепло, отведенное с нагретым топливом;  $q$  – расход топлива;  $i$  – кратность циркуляции;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $T_1$  – температура топлива, поступившего из смесителя;  $dQ_{F_1} = (\alpha_1 F_1 + \alpha_{n1} F_{n1})(T_1 - T_0)d\tau$  – тепло, отведенное внешним конвективным теплообменом;  $\alpha_1, \alpha_{n1}$  – коэффициенты теплоотдачи смесителя и трубопровода;  $F_1, F_{n1}$  – поверхности смесителя и трубопровода;  $dQ_{V_1} = (c_1 \rho_1 V_1 + c_{n1} \rho_{n1} M_{n1})(T_1 - T_0)dT_1$  – тепло, затраченное на нагрев смесителя и трубопровода  $I_1$ ;  $c_T, c_1, c_{n1}$  – теплоемкости топлива, смесителя, трубопровода;  $V_1, V_{n1}$  – объем материалов смесителя и трубопровода;  $\rho_1, \rho_{n1}$  – плотность материалов смесителя и трубопровода.

После соответствующих подстановок и некоторых преобразований будем иметь:

$$\int_{T_0}^{T_1} b_1 d\tau = \int_{T_0}^{T_1} \frac{dT_1}{a_1 - T_1}, \quad \text{т. е. } T_1 = a_1 - (a_1 - T_0)e^{-b_1 \tau}, \quad (10)$$

здесь  $a_1, b_1$  – переменные величины, зависящие от параметров, входящих в выражение (9):

$$a_1 = \left[ T_0 + \frac{P_1}{\alpha_1 F_1 + \alpha_{n1} F_{n1} + qic_T} \right];$$

$$b_1 = \frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_{n1} F_{n1} + qic_T}{c_1 \rho_1 V_1 + c_{n1} \rho_{n1} V_{n1}}.$$

Формула (10) описывает нестационарный процесс нагрева топлива, поступающего из смесителя по трубопроводу к ФГО.

Процесс нагрева топлива в ФГО описывается уравнением теплового баланса

$$P_2 d\tau = qic_T(T_2 - T_1)d\tau + (\alpha_2 F_2 + \alpha_{i2} F_{i2})(T_2 - T_0)d\tau + (c_2 \rho_2 V_2 + c_{i2} \rho_{i2} V_{i2})dT_2,$$

где  $T_1$  – температура топлива, подогретого в смесителе и поступившего в ФГО.

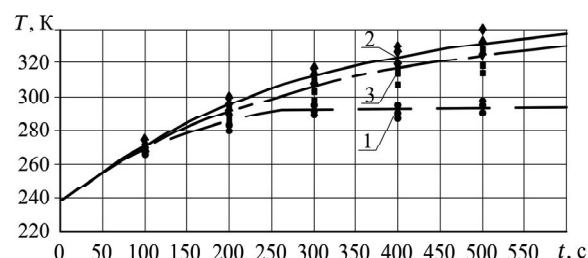
После соответствующих преобразований ур. (10) и применения метода конечных элементов температура  $T_2$ , характеризующая процесс нагрева топлива, поступившего в ФТО, может быть определена из выражения:

$$T_2 = T_0 + \left( \sum_1^j \Delta T_{2,j} \right), \quad (11)$$

где  $j$  – принятое количество элементарных интервалов температур.

На рис. 5 представлены расчетные кривые и результаты экспериментальных исследований системы подгрева элементов топливной системы машины при мощности нагревателей смесителя  $P_1 = 235,2$  Вт и ФГО  $P_2 = 553,2$  Вт при  $T_0 = 238$  К, позволяющие оптимизировать конструктивные параметры элементов, включенных в топливные системы машин по энергозатратам и, в совокупности с формулами (1), (8), (11), по фильтрационным показателям.

Для управления тепловым процессом топливной системы в электрической сети модернизированного фильтра имеется устройство, позволяющее автоматически поддерживать необходимую температуру топлива в соответствии с температурой окружающей среды.



**Рис. 5.** Динамика изменения топлива в элементах топливной системы: 1) только смеситель-подогреватель; 2) смеситель+подогреватель ФГО; 3) только подогреватель ФГО; точки – опытные данные; кривая – расчетные значения по формулам (10) и (11)

Сравнительные испытания тракторов МТЗ-82 в идентичных климатических условиях указали на явные преимущества модернизированного ФГО относительно штатного фильтра-отстойника. Нарботка прецизионных пар топливной системы до отказа возросла в 1,2...1,3 раза, а ресурс ФТО – в 1,5...1,6 раз.

Таким образом, предлагаемый вариант ФГО с нагревателем может поддерживать необходимую температуру топлива для исключения парафинизации и образования льда, что повышает ресурс ФТО и снижает изнашивание деталей топливной аппаратуры.

**Выводы**

1. Разработаны методы, позволяющие на стадии проектирования многофункциональных фильтров топливных систем машин с дизельными двигателями рассчитать их стандартные параметры.
2. Предложена модернизированная топливная система подогрева топлива машины с помощью двухфункционального фильтра с управляемой пористой структурой и самоподогревом от бортового электроснабжения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бродский Г.С., Сухоруков А.Н., Зуев В.И., Башева А.А. Результаты испытаний фильтров и фильтрующих элементов для СДМ // Строительные и дорожные машины. – 1992. – № 11–12. – С. 7–9.
2. Gustavsson J. Can we trust air filters? // Filtration & Separation. – 2000. – V. 37. – № 2 (March). – P. 16–22.
3. Бродский Г.С. Эффективность современных фильтрационных технологий при эксплуатации горных машин // Горная промышленность. – 2002. – № 5. – С. 2–6.
4. Бродский Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. – М.: Гемос, 2004. – 360 с.

3. Получены расчетные зависимости начального гидравлического сопротивления фильтра-нагревателя со спирально навитой пористой лентой, подтвержденные экспериментально.
4. Результаты тепловых испытаний системы подогрева и фильтрации топлива подтверждают адекватность теоретических представлений и могут быть использованы для оптимизации элементов топливных систем для мобильных машин, эксплуатируемых при низких температурах.

5. Фильтроэлемент: пат. 208494 Рос. Федерация № 4816035/06; заявл. 05.03.90; опубл. 28.04.94, Бюл. № 28. – 4 с.
6. Удлер Э.И. Фильтрация нефтепродуктов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988. – 216 с.
7. Фильтроэлемент: пат. 2186608 Рос. Федерация № 2001100255; заявл. 04.01.01; опубл. 10.08.02, Бюл. № 31. – 3 с.
8. Удлер Э.И., Зуев В.И. Фильтрующие топливно-масляные элементы из бумаги и картона. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983. – 140 с.
9. Удлер Э.И. Фильтрация углеводородных топлив. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. – 152 с.

Поступила 05.09.2011 г.

УДК 544.733.422:519.87

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ЖИДКОКАПЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**

О.Б. Кудряшова

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск  
E-mail: olgakudr@inbox.ru

*Математическая модель основана на уравнении Смолуховского, описывающем динамику изменения функции распределения частиц жидкокапельных аэрозолей по размерам с учетом испарения и осаждения. Применяя теорию размерностей, удалось получить критерии, характеризующие относительную эффективность процессов коагуляции и испарения. Проведен параметрический анализ уравнений в безразмерном виде. Представлены результаты экспериментального исследования дисперсных параметров аэрозоля.*

**Ключевые слова:**

*Жидкокапельный аэрозоль, распределение по размерам, испарение, коагуляция, осаждение.*

**Key words:**

*Liquid-drop aerosol, size distribution, evaporation, coagulation, sedimentation.*

Несмотря на то, что эволюция аэрозольных облаков исследовалась уже много десятилетий, полного понимания процессов, происходящих в жидкокапельном аэрозоле, до сих пор нет. Особенно сложными нам представляются вопросы описания кинетики субмикронных облаков: необходимо взаимосвязанно учитывать быстрое испарение капель, обусловленное с кривизной их поверхности, процессы осаждения и коагуляции. Предложенная в работе физико-математическая модель позволяет учесть эти процессы и получить представление об изменении дисперсных па-

раметров аэрозоля в зависимости от времени. Это представляет не только теоретический интерес, но является важным при разработке практических приложений, например, в области экологии (нейтрализация вредных выбросов, адсорбция токсичных веществ, дезинфекция помещений).

В атмосфере присутствует аэрозоль многомодальной структуры с характерными размерами от долей до десятков и сотен мкм [1]. В модельном аэрозоле, полученном в лабораторных условиях, распределение частиц по размерам можно считать одномодальным и соответствующим гамма-ра-