

Раздел III. Электроника, приборостроение, машиностроение

УДК 532,529

И.В. Борисов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ СКОРОСТИ КАПЕЛЬ ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

На основе экспериментальных данных о потере импульса продольной составляющей скорости капель после столкновения друг с другом получено выражение средней поперечной скорости капель после столкновения.

Парное столкновение капель; перераспределение импульса; поперечная скорость капель.

I.V. Borisov

EXPERIMENTAL ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION OF DROPS TRANSVERSE VELOCITY AFTER COLLISION FOR EFFICIENCY EVALUATION OF AVIATION FIRE-CONTROL UNITS

This paper presents the mean transverse drop velocity equation is received from experimental data about lengthwise velocity decrease after collision.

Drops pair collision; impulse redistribution; drops transverse velocity.

При численном моделировании работы авиационных систем пожаротушения важным фактором, влияющим на адекватность модели, является процесс столкновения капель огнегасящей жидкости. Процесс столкновения необходимо рассматривать как случайный, однако в этом случае для рассмотрения представительной выборки требуются огромные вычислительные ресурсы и мощности. В инженерной практике обычно используют так называемые полуэмпирические модели столкновений, основанные на статистически обработанных экспериментальных данных. Однако при таком подходе, а также из-за ограниченных возможностей натурального эксперимента часть данных о поведении капель теряется.

Рассмотрим только парные столкновения капель в терминах снаряда и мишени. Мишенью считается более крупная капля. В приведенной работе [1] модели газокапельного потока процесс столкновения капель представляется следующим образом. За некоторый интервал времени при относительно малой скорости сближения часть снарядов полностью сливается с мишенями, а часть испытывает касательные столкновения, при которых снаряд теряет часть импульса. При относительно высокой скорости часть снарядов испытывает касательное столкновение с потерей импульса, а часть – выбивает из мишени несколько осколков и отскакивает сама. Осколки как бы отваливаются от мишени, которая за счет удара ускоряется. Отскочивший снаряд может при этом потерять часть импульса. В данной схеме столкновений не учитываются во всей полноте экспериментальные данные о дис-

персном составе осколков, с другой стороны, здесь нет неопределенности с импульсом снарядов, осколков и мишени. Фактически реализована так называемая «гипотеза 1» [2] о перераспределении импульса и энергии нового вещества в группе капель, имеющих одинаковую скорость в локальной области пространства (расчетной ячейке) - он равномерно распределяется по всем каплям. Эту гипотезу не обязательно связывать с реальным механизмом выравнивания параметров капель, а можно рассматривать как осреднение скорости и температуры внутри группы.

Существуют похожие модели столкновений (см., например, [2-5]). Не претендуя на оригинальность, отметим, что в данной модели:

- ◆ в схеме столкновений проведено деление осколков на осколки-снаряды (это капли, столкнувшиеся с более крупной каплей, но не изменившие своей массы) и осколки от мишени (это капли, образованные из вещества крупной капли, испытавшей столкновение);
- ◆ учтена система координат при использовании экспериментального коэффициента потери импульса β ;
- ◆ в схеме расчета подробно описана ситуация полного развала крупной капли в результате столкновения с более мелкой каплей-снарядом.

В некотором объеме каждая группа капель i имеет характерные диаметр D_{p_i} , скорость W_{p_i} , объемную концентрацию a_{p_i} , температуру T_{p_i} ¹. Для группы i возможно столкновение с более мелкими и с более крупными каплями из других групп. Столкновение с каплями такого же диаметра отнесем к случаю столкновения с более мелкими каплями. Рассмотрим эти процессы с использованием того же подхода и обозначений, что и в работе [4]. Для удобства будем использовать две системы координат: связанную со скоростью мишени до столкновения и абсолютную, связанную с источником капель (например, форсункой). Дополнительно введен коэффициент β уменьшения, скорости отскочивших снарядов в системе координат мишени.

За время dt столкновение капль группы i с каплями группы j может произойти, если центр капли D_{p_i} будет находиться в цилиндре с площадью основания $\pi(D_{p_i}+D_{p_j})/4$ и длиной, образующей $|W_{p_i}-W_{p_j}|dt$. Вероятность столкновения капль учитывается введением коэффициента захвата $e_{ij}<1$ [2]. Одна капля D_{p_i} с учетом коэффициента захвата e_{ij} испытает

$$\pi(D_{p_i}+D_{p_j})^2 \times |W_{p_i}-W_{p_j}| \times e_{ij} \times n_j \times dt / 4$$

соударений с каплями D_{p_j} . Здесь n_j – число капль группы j в единице объема. Произведение

$$K_{ij} = \pi(D_{p_i}+D_{p_j})^2 \times |W_{p_i}-W_{p_j}| / 4$$

называется константой коагуляции. В единицу времени одна капля диаметром D_{p_i} испытает

$$K_{ij} \times e_{ij} \times n_j$$

столкновений с каплями D_{p_j} . Исход столкновений, которые могут закончиться либо слиянием (коагуляцией) взаимодействующих капль, либо дроблением крупной капли, описывается коэффициентом эффективности соударений, представляющим собой математическое ожидание отношения изменения объема крупной капли (мишени) группы i к суммарному объему столкнувшихся с ней в течение некоторого времени мелких капль (снарядов) j :

¹ Характерные величины вводятся по массе, импульсу и энергии как средние арифметические с учетом числа капль в объеме.

$$F_{ij} = \Delta V_i / (\Sigma V)_j.$$

При полном слиянии $F_{ij}=1$, при дроблении $F_{ij}<1$, если в осколки переходит часть вещества мишени $F_{ij}<0$. Способ определения этой величины подробно описан в [1, 2].

В этой модели предполагается, что после столкновения все капли движутся в направлении вектора скорости сближения капль до удара. При таком подходе не учитывается поперечная, относительно скорости сближения, диффузия капль, что может вызвать не соответствующее реальности накопление капль в отдельных зонах течения. Следующим шагом развития модели является учет боковой составляющей скорости, которая появляется в результате столкновения капль.

Интерес представляет ситуация, когда в результате столкновения получается более одной капль (так называемые вторичные капль-осколки). На основании экспериментов [2] получен коэффициент β уменьшения скорости вторичных капль:

$$|V'| \times \cos(V', V_j) / |V_j| = \beta = 0,08 + 0,016 \times We_i,$$

где i – индекс мишени, j – индекс снаряда, V' – вектор скорости осколков, V_j – вектор скорости снаряда в системе координат мишени до столкновения. Тогда продольный импульс осколков

$$\beta \times |V_j| = |V'| \times \cos(V', V_j),$$

а поперечная скорость капль $U_{бок}$ (в системе координат мишени до столкновения) определяется из закона сохранения энергии при столкновении:

$$4\pi\sigma r_i^2 + 4\pi\sigma r_j^2 + M_j V_j^2 / 2 = (M_j + M_j F_{ij}) V_{i_new}^2 / 2 + \\ + M_j (1 - F_{ij}) (|V_j| \beta)^2 / 2 + 4\pi\sigma r_{i_new}^2 + \\ + M_j (1 - F_{ij}) U_{бок}^2 / 2 (4 \times 1 / 4) + N_{осколки} 4\pi\sigma r_{осколки}^2,$$

где i_{new} – параметры капль после столкновения, $F_{ij} = (i_{new} - M_i) / M_j$, $M_i = 4\pi\rho r_i^3 / 3$ и $M_j = 4\pi\rho r_j^3 / 3$ – соответственно масса мишени и снаряда, $4\pi\sigma r^2$ – энергия сил поверхностного натяжения, $N_{осколки}$ – число капль-осколков, $r_{осколки}$ – средний радиус осколков. При записи закона сохранения энергии не учитываем разность температур из-за поверхностного давления. Полагаем, что энергия удара не меняет температуру капль. После удара температура капль одинакова и равна $T_{p_средн}$, определяемой из соотношения

$$CT_{p_средн}(M_i + M_j) = CT_i M_i + CT_j M_j.$$

Следовательно

$$U_{бок}^2 = 8\pi\sigma (r_i^2 + r_{i_new}^2 + N_{осколки} r_{осколки}^2) / [M_j (1 - F_{ij})] + \\ + [M_j V_j^2 - (M_j + M_j F_{ij}) V_{i_new}^2] / [M_j (1 - F_{ij}) - (|V_j| \beta)^2].$$

Проблема возникает, когда $F_{ij} \sim 1$, поэтому определяем число осколков по экспериментальным данным из [6] с учетом того, что имеем дело со множеством актов взаимодействия капль:

$$N_{осколки} = N_{нить} + N_{пелена} + N_{диск},$$

где *нить*, *пелена* и *диск* обозначают форму мишени непосредственно после удара

$$N_{нить} = 4,95 + 38,68(r_j \times 100 + 0,085)^2 - [214,4 + 5,095 \times 10^4 (r_j \times 100 - 0,2015)^2 (r_j \times 100)^{2,5}],$$

$$N_{пелена} = 5,095(0,5405 \times 10^6 \times U_{\sigma \varepsilon} - 1,368) + 6; U_{\sigma \varepsilon} = 4\pi\sigma (k_{ш}^2 + k_0^2),$$

$$N_{диск} = 297,5 + 23,7 \ln(Ev); Ev = |V_j - V_i|^2 \times M_i M_j / [2(M_i + M_j)].$$

Вероятность дробления P в соответствующем режиме:

если $E_V < E_{V_c} = 0,893 \times 10^{-6}$ Дж, то $P_{\text{нить}} = 1$, иначе $P_{\text{нить}} = 1,11 \times 10^{-4} \times E_V^{-0.654}$;

если $D < D_c = 0,86$, то $P_{\text{пелена}} = 0$, иначе $P_{\text{пелена}} = 0,685 \{ 1 - \exp[-1.63(D - D_c)] \}$;

$$D = E_V / E_{\sigma}'; P_{\text{диск}} = 1 - P_{\text{нить}} \times P_{\text{пелена}}.$$

Определяем общую массу вторичных капель по известной из экспериментов функции распределения [2]:

$$n(R) = \exp[-(\ln R - \ln R')^2 / (2 - \ln^2 \Sigma)] / [(2\pi)^{0.5} \times R \ln \Sigma:],$$

$$R = r' / \Gamma_j,$$

где r' – радиус осколка (не средний!)

$$\ln R' = -1,13 - We_i^{0.08} \times Re_{ij}^{0.65} \times Lp_i^{-0.57} \Gamma_{ij}^{-0.25},$$

$$\ln \Sigma = 0,61 We_i^{-0.15} \times Re_{ij}^{0.11} \times Lp_i^{-0.014} \Gamma_{ij}^{-0.016},$$

где $\Gamma_{ij} = Dp_i / Dp_j$; $Re_{ij} = \rho_p Dp_i |Wp_j - Wp_i| / \mu_p$; $Lp_i = \rho_p \times Dp_j \times \sigma / \mu_p^2$ – число Лапласа, $We_i = \rho_g |Wg - Wp_i|^2 \times Dp_i / \sigma$. Средний радиус осколков $r_{\text{осколки}}$ и их масса $M_{\text{осколки}}$ определяются из соотношения

$$M_{\text{осколки}} = \int \{ [n(r' / \Gamma_j) 4\pi \rho_p r'^3 / 3] dr' \}_{0 \dots \infty} = N_{\text{осколки}} \times 4\pi \rho_p r_{\text{осколки}}^3 / 3.$$

Интеграл в этом соотношении определяется численно.

По данным об осколках можно определить F_{ij} отличным от формул [2] способом:

$$F_{ij} = (M_{i_new} - M_i) / M_j = (M_i + M_j - M_{\text{осколки}} - M_i) / M_j = (M_j - M_{\text{осколки}}) / M_j = 1 - M_{\text{осколки}} / M_j.$$

Эта величина используется для определения $V_{\text{бок}}$ в случае, когда исходная $F_{ij} \sim 1$ (по формулам из [2]).

Полученную поперечную скорость можно перевести в основную (неподвижную декартовую) систему координат и учитывать при определении потоков массы, импульса и энергии через поверхность рассматриваемого элемента объема (расчетной ячейки).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ципенко А.В. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте: дисс... д-ра тех. наук. – М.: ГосНИИ ГА, 2006.
2. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. – 320 с.
3. Рышков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. – Новосибирск.: Наука, Сибирское отделение, 1988. – 222 с.
4. Зувев Ю.В., Лепешинский И.А., Чабанов В.А. Неизотермическая двухфазная турбулентная струя // Проблемы турбулентных течений. – М.: ЦИАМ, тр.№ 1287. – С. 131-144.
5. Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. – Киев: Наук. думка, 1980. – 252 с.
6. Low T.B., List R. Collision, coalescence and breakup of rain-drops. Part I // J. Atmos. Sci., 1982, vol. 39, N 7. – P. 1591-1606; Part II // J. Atmos. Sci., 1982, vol. 39, N 7. – P. 1607-1618.

Борисов Игорь Викторович

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: la@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371697.

Borisov Igor Viktorovitch

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ia@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371697.

УДК 621. 941.2 – 82.192

**В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, А.Д. Захарченко, Р.Г. Шаповалов, Л.В. Гусакова,
В.Н. Подножкина, Е.С. Фоменко, Т.А. Рыбинская, Д.И. Диденко**

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Приведена информация о направлениях совершенствования процессов шлифования путем активации подаваемой СОЖ и энергетического подхода к выбору абразивного инструмента, предложен метод поверхностно-пластического упрочнения сварного шва, даны рекомендации по выбору углеродных нанотрубок и конструкционных материалов деталей трибосистем.

Шлифование; активация; сварные швы; нанотрубки; оптимизация; кластерные наноструктуры; интенсивность изнашивания

**V.I. Butenko, D.S. Durov, A.D. Zakharchenko, R.G. Shapovalov, L.V. Gusakova,
V.N. Podnozhkina, Y.S. Fomenko, T.A. Rybinskaya, D.I. Didenko**

**PERSPECTIVE CONSTRUCTOR-TECHNOLOGICAL DIRECTIONS OF
INCREASE OF EFFICIENCY OF PROCESSES OF MACHINE-BUILDING
MANUFACTURE**

The information on directions of perfection of processes of grinding is given by activation of a submitted lubricating-cooling liquid and power approach in a choice of the abrasive tool, the method of superficial-plastic hardening of a welded seam is offered, the recommendations are given at the choice of carbon nanotubes and constructional materials of details of tribosystems.

Grinding; activation; welded seams; nanotubes; optimization; cluster nanotubes; intensity of wear process.

Современное машиностроительное производство отличается высокой динамичностью развития и активным использованием результатов научных исследований как в области технологии машиностроения, так в смежных научных направлениях. При этом наиболее перспективными становятся конструкторско-технологические направления повышения эффективности машиностроительного производства в не зависимости от его типа и вида.

Известно, что большинство деталей машин подвергается шлифованию, эффективность которого во многом определяется состоянием режущего контура используемого абразивного круга. В этом отношении перспективным является применение в металлообработке шлифования и правки шлифовальных кругов магнитной активации смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) с наложением ультразвуковых колебаний. Исследования показали, что наложение ультразвуковых колебаний способствует ускорению движения СОЖ сквозь сеть капиллярных каналов к зонам контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом. Акустическое распыление СОЖ с помощью энергии ультразвукового поля позво-