

## Косвенное определение дисперсности распыленного топлива по геометрии зоны пятна смачивания

*В.В. Бараниченко, В.И. Грищенко, Д.С. Цымбалов, О.В. Яценко*

*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Разработана программа компьютерной имитации распыливания жидких топлив. Проведен специальный калибрующий эксперимент в гравитационном поле. Выполнена верификация компьютерной модели с экспериментальными данными, корректность имитационного моделирования определяется сходимостью результатов статического обобщения. Проведены испытания макетного образца горелочного устройства, подтверждающие адекватность компьютерной имитации.

**Ключевые слова:** горелочное устройство, распыливание жидких топлив, математическое моделирование, динамика диспергирования топливной струи, форсунка.

Качественное горение в горелочном устройстве (ГУ) обеспечивается в т.ч. должным распыливанием дизельного топлива и его равномерным перемешиванием с подаваемым воздухом. Показателем качества распыливания служит мелкость (средний диаметр) капель  $\langle \varnothing \rangle$ . Достаточной является мелкость  $\langle \varnothing \rangle$ , гарантирующая испарение капли за время пребывания ее в зоне горения. Отсюда, увеличение качества распыливания добивается уменьшением среднего диаметра капли, что повышает качество горения.

Эксперименты, связанные с определением качества распыливания форсуночного устройства, зачастую требуют крупных финансовых вложений [1]. Наиболее точным из них является метод определения мелкости распыливания с использованием современных лазерных анализаторов размера частиц распыления [2].

С целью уменьшения затрат для выявления связи между характерным диаметром распыла  $\langle \varnothing \rangle$  и качеством горения топливно-воздушной смеси (ТВС) в ГУ для определения эффективных коэффициентов межфазного переноса в интегрированной имитационной модели спланирован

специальный калибрующий эксперимент. Идея эксперимента состоит в сопоставлении динамики реального (холодного, без поджига) топливного факела с результатами множественной компьютерной имитации. Последняя предполагает расчет индивидуальной динамики большого числа капель распыленного жидкого топлива в гравитационном поле.

В процессе конструирования модели распыла и динамики диспергированной топливной струи в гравитационном поле подбирались некоторые параметры и соотношения [3], обеспечивающие качественное согласие результата с данными непосредственного диспергационно-гравитационного эксперимента (рис. 1).

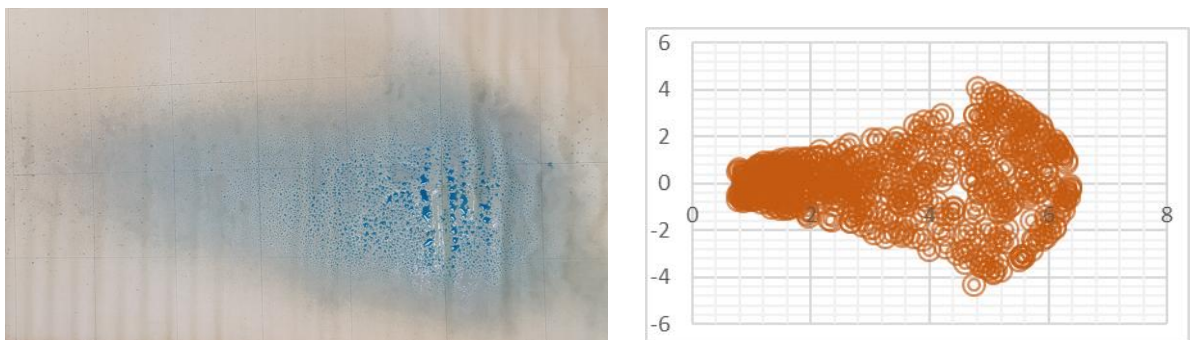


Рис. 1. – Вид области осаждения (пятна) жидкости, распыленной пульверизатором с высоты 1 м в горизонтальном направлении (слева) и смоделированной на основе уравнений (справа)

Множественные результаты непосредственной компьютерной симуляции допускают статистическое обобщение. Для этого необходимо ввести новые переменные в зоне осаждения –  $r = (x^2 + z^2)^{1/2}$  и  $\varphi = \arctg z/x$ . Затем для набора 10, 30, 100, 300, 1000, ... 100000 капель выполняется расчет координат их падения ( $r$ ,  $\varphi$ ). Начальные параметры капли и ее траектории выбираются случайным образом в рамках принимаемых на основе данных рис. 1 ограничений [4-6].

Для диаметра вылетающей капли:

$$F(\varnothing) = 1 - e^{-(\varnothing/\langle\varnothing\rangle)^n}, \quad (1)$$

где  $n = 3$ ;

для начальных углов вылета  $\beta$  и  $\gamma$ :

$$\beta: P(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta < -\alpha \\ \frac{1}{2\alpha}, & -\alpha \leq \beta \leq \alpha \\ 0, & \beta > \alpha \end{cases}, \quad (2)$$

$$\gamma: P(\gamma) = \begin{cases} 0, & \gamma < -\alpha \\ \frac{1}{2\alpha}, & -\alpha \leq \gamma \leq \alpha \\ 0, & \gamma > \alpha \end{cases},$$

для абсолютной (модуля) начальной скорости  $|V_0|$ :

$$|V_0| = \Phi(|\langle V_0 \rangle|, \beta, \gamma) \approx \Phi(|\langle V_0 \rangle|) = 10^{-1+3 \cdot \text{СЧ}(0...1)} \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $\langle\varnothing\rangle$  – характерный диаметр капли, случайно выбираемый из диапазона  $1 \div 1000$  мкм;  $\beta$  и  $\gamma$  – случайно выбираемые угловые отклонения в вертикальной и горизонтальной плоскости в диапазоне заданной конусности распыла –  $\div \alpha$ .

Множественные результаты имитационного эксперимента обобщались при помощи соотношений:

$$\lg r = A + B \lg \varnothing + C \lg |\langle V_0 \rangle| + D \lg |\alpha|, \quad (4)$$

$$\lg \varphi = E + F \lg \varnothing + G \lg |\langle V_0 \rangle| + H \lg |\alpha|, \quad (5)$$

в которых  $r$  – расстояние от точки старта до точки падения капли в горизонтальной плоскости;  $\varphi$  – угловое отклонение траектории капли от вертикальной плоскости;  $A, B, C, D, E, F, G, H$  – параметры обобщенной модели динамики распыленного в воздухе ДТ.

Для определения последних использовалась последовательность 100000 имитационных экспериментов, результаты которых обрабатывались в рамках последовательно удлиняемых выборок. В рамках метода

многофакторного анализа определение  $A, B, C, D, E, F, G, H$  сводится к задаче математического программирования [7]

$$\sum [\lg r_i - (A + B \lg \varnothing_i + C \lg |V_0|_i + D \lg |\alpha_i|)]^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum [\lg r_i - (E + F \lg \varnothing_i + G \lg |V_0|_i + H \lg |\alpha_i|)]^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $i = 0, \dots, I$  – номер опыта и их число соответственно.

Задача сводится к системе линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \\ \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n (\log \varnothing_i)^2 & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log \varnothing_i \\ \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n (\log |V_0|_i)^2 & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log |V_0|_i \\ \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n (\log(1 + |\alpha_i|))^2 \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \log r_i \\ \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i \log r_i \\ \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log r_i \\ \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log r_i \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \\ \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n (\log \varnothing_i)^2 & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log \varnothing_i \\ \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n (\log |V_0|_i)^2 & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log |V_0|_i \\ \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log \varnothing_i & \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log |V_0|_i & \sum_{i=1}^n (\log(1 + |\alpha_i|))^2 \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} E \\ F \\ G \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \log(1 + |\varphi_i|) \\ \sum_{i=1}^n \log \varnothing_i \log(1 + |\varphi_i|) \\ \sum_{i=1}^n \log |V_0|_i \log(1 + |\varphi_i|) \\ \sum_{i=1}^n \log(1 + |\alpha_i|) \log(1 + |\varphi_i|) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

О корректности представления данных прямой имитации посредством формул (6)-(7) позволяет судить сходимость последовательности коэффициентов  $\{A, B, C, D, E, F, G, H\}_N$ , в которой  $N$  – число учтенных индивидуальных траекторий (табл. 1). Другим критерием качества этих аппроксимирующих формул служит их коррелированность с исходными данными и мера относительной погрешности при различном числе «опытов»  $N$ . Соответствующие параметры качества модели (4)-(5) составляют 0.91 для коэффициента корреляции и 0.14 (или примерно 40 %) для среднеквадратичной погрешности, что означает практическую

возможность надежно определять мелкость распыливания струи по плотности распределения пятна оседания.

Таблица №1

Сходимость результатов статистического обобщения (4)-(5) в зависимости от числа испытаний

<i>l</i>	10	30	100	300	1000	3000	10000
A	-1,96275	-2,04004	-2,05276	-2,12691	-2,19647	-2,17888	-2,18331
B	1,004491	1,046139	1,095796	1,010833	0,991038	1,005149	0,996117
C	0,735549	0,790535	0,737026	0,726814	0,733491	0,73876	0,737453
D	-0,15229	-0,07301	-0,01238	-0,02007	0,009375	0,004251	-0,0017
E	0,420494	0,37479	0,420839	0,319515	0,490381	0,488196	0,487328
F	-0,02118	0,101351	0,088732	-0,09801	-0,02112	-0,00794	0,00074
G	0,000417	-0,01588	-0,00802	-0,00437	-0,00219	0,000398	0,000723
H	0,652889	0,8053	0,765897	0,672637	0,609236	0,622609	0,630823

Из данных этой таблицы следует, что удаленность точки падения капли прямо пропорциональна ее диаметру, пропорциональна модулю начальной скорости в степени  $\frac{3}{4}$  и не зависит от угла распыливания. В то же время среднее угловое отклонение капли от оси струи зависит лишь от начального угла конуса распыливания в степени, близкой к  $\frac{2}{3}$  [8,9].

Сопоставление этой модели с результатами испытаний макетного образца ГУ мощностью  $\sim 1$  кВт показало (рис. 2), что при истечении из сопла диаметром 0.3 мм струя ДТ комнатной температуры под давлением 2 атм. без распыла преодолевала расстояние порядка 5 м. Подача перегретого пара в зону истечения нормально его направлению приводила к дроблению струи и укорочению зоны оседания [10]. В экспериментах зафиксировано, что осевой размер зоны оседания существенно сокращался с увеличением подачи перегретого пара и его температуры в соответствии с моделью (4)-(5).



Рис. 2. – Схема дополнительного парового диспергирования ДТ (справа) для эффективного распыливания в условиях предварительных испытаний макетной установки (слева – общий вид).

**Вывод.** Разработана программа компьютерной имитации распыливания жидких топлив. Проведен специальный калибрующий эксперимент в гравитационном поле. Выполнена верификация компьютерной модели с экспериментальными данными, корректность имитационного моделирования определяется сходимостью результатов статического обобщения. Проведены испытания макетного образца горелочного устройства, подтверждающие адекватность компьютерной имитации.

### Литература

1. Маецкий, А. В., Гребеньков А. А. Обзор приборов и методов исследования качества распыливания топлива дизельной форсункой. // Молодой ученый. — 2011. — № 10 (33). — Т. 1. — С. 48-54. — URL: [moluch.ru/archive/33/3736/](http://moluch.ru/archive/33/3736/)
2. Анализатор размера частиц распыления и капель распыления AEROTRAC II / URL: [microtrac.com/ru/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/aerotrac-ii/](http://microtrac.com/ru/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/aerotrac-ii/).
3. Ладоша, Е. Н., Цымбалов, Д.С., Яценко, О. В. Информационное моделирование распыливания и испарения моторного топлива в дизельном

двигателе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – Т. 12, № 1-1(62). – С. 5-14.

4. Анискин, С. В. Столкновение капель при распыливании жидкости в струйном газопромывателе // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 2-3. – С. 152.

5. Фарбер В. С., Церуашвили Г. Е., Квашали Г. Ф. Способ определения размеров капель при распыливании жидкости. Авторское свидетельство № 1509674 // Научно-исследовательский проблемный центр механизации применения химических средств в сельском хозяйстве. – 1989. – Бюл. №35. URL: [patents.su/2-1509674-sposob-opredeleniya-razmerov-kapel-pri-raspylivanii-zhidkosti.html](http://patents.su/2-1509674-sposob-opredeleniya-razmerov-kapel-pri-raspylivanii-zhidkosti.html)

6. Ходырев, А. И., Муленко, В. В. Об инерционном осаждении капель жидкости, впрыскиваемой в трубопровод центробежной форсункой // Территория Нефтегаз. – 2018. – № 3. – С. 72-78.

7. Романова М. Н., Лебедев А. Е., Ватагин А. А., Лебедев Д. В. Определение гидродинамических характеристик однородных и двух несмешивающихся жидкостей // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778)

8. Tanner, Franz. X. “Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays.” SAE Transactions, vol. 106, 1997, pp. 127–40. JSTOR, [jstor.org/stable/44730666](http://jstor.org/stable/44730666).

9. Snyder, H. E., and R. D. Reitz. “Gas Efficient Liquid Atomization Using Micro-Machined Spray Nozzles.” SAE Transactions, vol. 105, 1996, pp. 1260–70. JSTOR, [jstor.org/stable/44736353](http://jstor.org/stable/44736353).

10. Ларионов В. М., Сайфуллин Э. Р., Назарычев С. А., Малахов А. О., Юнусова Э. А., Константинов Н. В. Экспериментальная оценка скорости горения метано-водородного топлива с воздухом при изменении



концентрации водорода // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4 URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5317

### References

1. Maeczkiy, A. V., Greben`kov, A. A. Molodoj ucheny`j. 2011. № 10 (33). V. 1. pp. 48-54. URL: [moluch.ru/archive/33/3736/](http://moluch.ru/archive/33/3736/)
2. Analizator razmera chasticz raspy`leniya i kapel` raspy`leniya AEROTRAC II. [Spray Particle and Spray Droplet Size Analyzer AEROTRAC II] URL: [microtrac.com/ru/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/aerotrac-ii/](http://microtrac.com/ru/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/aerotrac-ii/).
3. Ladasha, E. N., Czy`mbalov, D. S., Yaczenko, O. V. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. V. 12, № 1-1(62). pp. 5-14.
4. Aniskin, S. V. Novaya nauka: Ot idei k rezul`tatu. 2016. № 2-3. P. 152.
5. Farber V. S., Czeruashvili G. E., Kvashali G. F. Sposob opredeleniya razmerov kapel' pri raspylivanii zhidkosti [Method for determining droplet sizes when spraying liquid] Avtorskoe svidetel`stvo № 1509674. Nauchno-issledovatel'skiy problemnyy tsentr mekhanizatsii primeneniya khimicheskikh sredstv v sel'skom khozyaystve. 1989. Byul. №35. URL: [patents.su/2-1509674-sposob-opredeleniya-razmerov-kapel-pri-raspylivanii-zhidkosti.html](http://patents.su/2-1509674-sposob-opredeleniya-razmerov-kapel-pri-raspylivanii-zhidkosti.html)
6. Khody`rev, A. I., Mulenko, V. V. Territoriya Neftegaz. 2018. № 3. pp. 72-78.
7. Romanova M. N., Lebedev A. E., Vatagin A. A., Lebedev D. V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2019. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778)
8. Tanner, Franz. X. SAE Transactions, vol. 106, 1997, pp. 127-40. JSTOR, [jstor.org/stable/44730666](http://jstor.org/stable/44730666).





9. Snyder, H. E., and R. D. Reitz. SAE Transactions, vol. 105, 1996, pp. 1260-70. JSTOR, [jstor.org/stable/44736353](https://www.jstor.org/stable/44736353).

10. Larionov V. M., Sajfullin E. R., Nazary`chev S. A., Malakhov A. O., Yunusova E. A., Konstantinov N. V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2018. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5317](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5317)

**Дата поступления: 22.8.2023**

**Дата публикации: 8.12.2023**