

*А.Е. Басманов, д.т.н., професор, гл. научн. сотр., НУГЗУ,
И.А. Горпинич, нач. УПСЧ, НУГЗУ*

РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОСТИ НА НЕГЛАДКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АВАРИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Построена математическая модель, описывающая динамику гравитационного растекания жидкости на негладкой горизонтальной поверхности при аварии на железнодорожном транспорте. Для случая растекания на сухом грунте экспериментально определен параметр модели.

Ключевые слова: горючая жидкость, растекание, площадь разлива.

Постановка проблемы. Разрушение цистерн в результате аварии на железнодорожном транспорте и, как следствие, растекание их содержимого является одной из опасных и сложных для ликвидации чрезвычайной ситуацией. Ситуация усугубляется в случае испарения жидкости, образования и движения взрывоопасного или ядовитого облака. Поэтому оценка площади разлива является одним из необходимых параметров для выработки плана локализации и ликвидации аварии.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] построена модель гравитационного растекания жидкости на идеально гладкой горизонтальной поверхности. В то же время, любая реальная поверхность (бетон, асфальт, грунт, щебень) содержит неровности. Это могут быть, например, трещины, углубления, растительность и т.д. Поэтому, растекание жидкости сопровождается заполнением углублений, вызванных этими неровностями, что приводит к меньшему радиусу разлива, чем в случае гладкой поверхности.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение математической модели растекания жидкости на негладкой горизонтальной поверхности и экспериментальное определение параметра модели.

Растекание жидкости сопровождается заполнением углублений, вызванных неровностями поверхности. Фактически это означает, что некоторый объем растекающейся жидкости расходуется на заполнение углублений:

$$V_{\text{угл}}(t) = S(t)\delta,$$

где $V_{\text{угл}}(t)$ – объем жидкости заполнившей углубления к моменту вре-

мени t ; $S(t)$ – площа разлива в момент времени t ; δ – средняя глубина неровностей поверхности.

С учетом потерь жидкости на заполнение неровностей, уравнение для радиуса разлива [1] примет вид

$$R'' = \frac{g(V(t) - V_{y2l}(t))}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - V_{y2l}(t))} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - V_{y2l}(t))} - \frac{2\pi R\sigma}{\rho(V(t) - V_{y2l}(t))}.$$

С учетом зависимости $V_{y2l} = \pi R^2 \delta$ для жидкости, растекающейся в форме круга, получим

$$R'' = \frac{g(V(t) - \pi R^2 \delta)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} - \frac{2\pi R\sigma}{\rho(V(t) - \pi R^2 \delta)}. \quad (1)$$

При этом максимальный радиус R_{\max} разлива жидкости объема V будет определяться из соотношения

$$V = \pi R_{\max}^2 \delta + \pi R_{\max}^2 h_{\min}, \quad (2)$$

где первое слагаемое в правой части соответствует объему жидкости, заполнившей неровности поверхности, а второе – равновесию силы поверхностного натяжения и силы давления на боковые стенки цилиндра; h_{\min} – минимальная толщина разлива жидкости на гладкой поверхности [1]. Подставляя зависимость толщины разлива на гладкой поверхности от свойств жидкости в (2), получим максимальный радиус разлива, соответствующий объему V жидкости:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{V}{\pi \left(\delta + \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} \right)}}. \quad (3)$$

Полученная зависимость позволяет определить среднюю глубину неровности поверхности при известном объеме разлитой жидкости V и максимальной площади разлива S_{\max} :

$$\delta = \frac{V}{S_{\max}} - \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}. \quad (4)$$

С целью определения средней глубины неровностей поверхности был проведен эксперимент, в ходе которого разливалась жидкость (вода) и определялась покрытая ею площадь. Эксперимент проводился на сухом грунте. Для этого на поверхность предварительно наносились отметки мелом, что позволило затем построить сетку на кадрах, вырезанных из видеозаписи процесса растекания жидкости (рис. 1). Сетка построена с шагом $\Delta = 1 \text{ м}$.

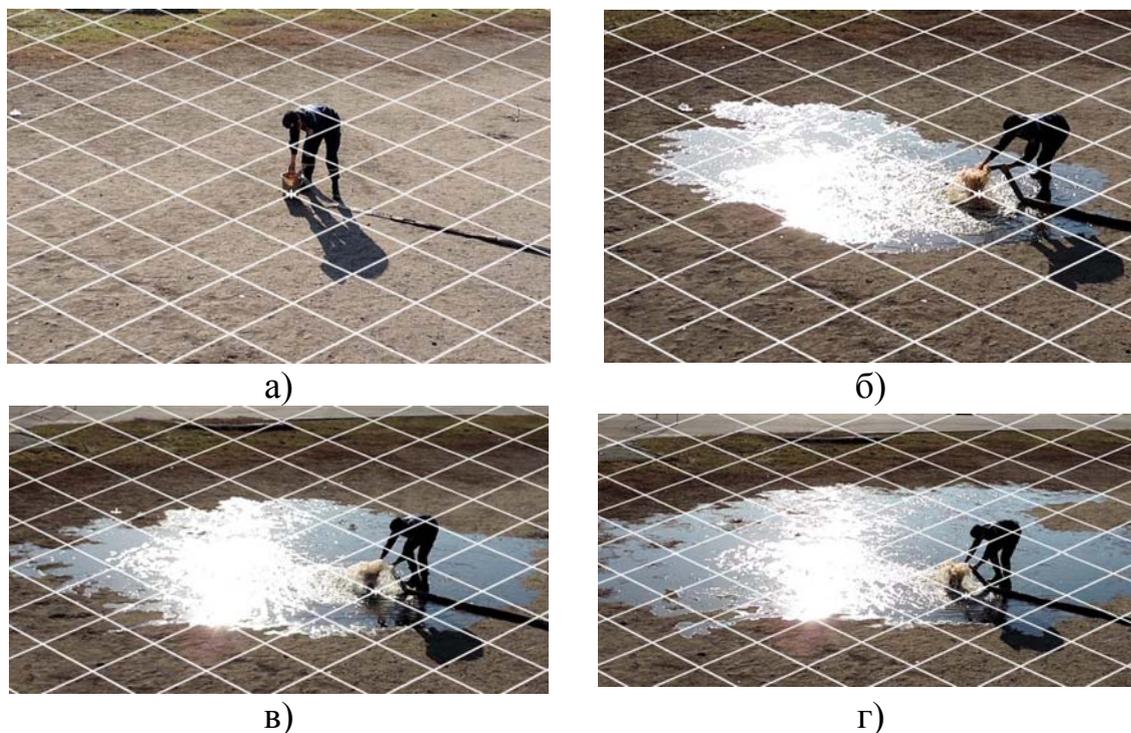


Рис. 1. Растекание воды на сухом грунте в различные моменты времени: а) $t = 0$; б) $t = 10 \text{ с}$; в) $t = 40 \text{ с}$; г) $t = 55 \text{ с}$

Вода подавалась через пожарный рукав без насадка, присоединенный как насосу автомобиля АЦ 40(130)63Б. Интенсивность подачи определялась путем измерения времени, необходимого для заполнения емкости, объемом 20 л, и составила $I = (7 \pm 1) \text{ л/с}$. Для погашения скорости воды, выходящей под давлением из рукава, и недопущения размыва грунта под рукавом, рукав был опущен в ведро, объемом 10 л (рис. 1). Площадь разлива определялась в ходе анализа кадров видеосъемки путем подсчета квадратов сетки, покрытых разливом. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Изменение радиуса разлива во времени описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$R'' = \frac{g(V(t) - \pi R^2 \delta)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2} \pi c_a c_1^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} - \frac{2\pi R \sigma}{\rho(V(t) - \pi R^2 \delta)}; \quad (5)$$

Табл. 1. Результати експеримента по растеканию воды на сухом грунте

Номер наблюдения, i	Момент времени, t_i , с	Площадь разлива, S , m^2
1	0	0
2	5	3
3	10	5
4	20	8
5	30	12
6	40	15
7	50	19
8	60	23
9	70	26
10	80	28
11	90	31
12	100	32
13	110	33
14	120	38
15	130	41
16	140	45
17	150	49

$$V(t) = \pi R_0^2 \delta + \pi R_0^2 \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} + It; \quad (6)$$

с начальным условием $R(0) = R_0$, где $R_0 = 0,1$ м; $\rho = 1000$ кг/м³; $\sigma = 0,073$ Н/м; $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с [2]; δ – неизвестный параметр. Значение параметра δ подбиралось методом наименьших квадратов

$$\sum_{i=2}^{17} (S(t_i) - \tilde{S}_i)^2 \rightarrow \min_{\delta}, \quad (7)$$

где $S(t_i) = \pi R^2(t_i)$; $R(t_i)$ – значение радиуса разлива в момент времени t_i , полученное путем решения уравнений (5)-(6), \tilde{S}_i – экспериментально определенная площадь из табл. 1. Решение задачи (7) в среде Maple дает оценку $\delta = 0,017$ м.

На рис. 2 приведены расчетные значения площади разлива, полученные из (5)-(6), и экспериментально определенные значения из табл. 1.

Практически линейная зависимость площади разлива от времени свидетельствует о том, что при данном расходе воды она, практически мгновенно растекается по всей площади.

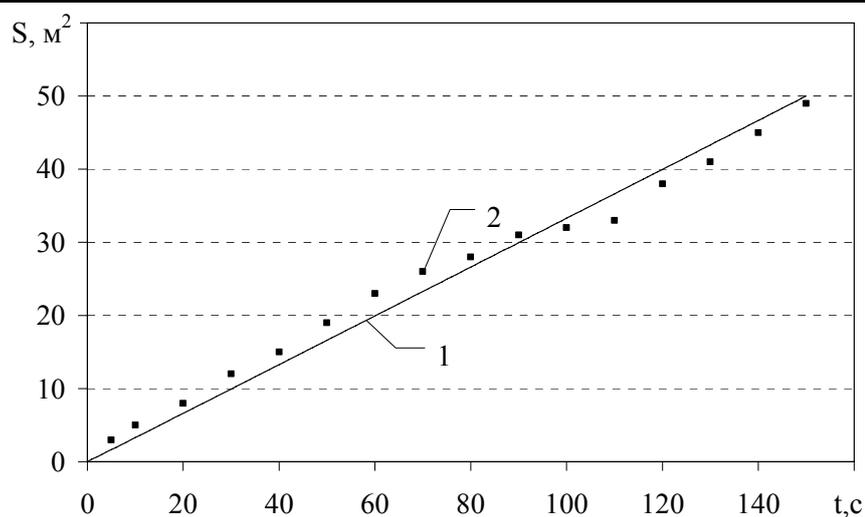


Рис. 2. Изменение площади разлива во времени: 1 – расчет; 2 – эксперимент

Выводы. Построена математическая модель гравитационного растекания жидкости на негладкой горизонтальной поверхности. Показано, что зависимость радиуса разлива от времени описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка. Для случая разлива на сухом грунте определен параметр модели – средняя глубина неровностей поверхности, составившая 0,017 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горпинич И.А. Моделирование динамики разлива горючей жидкости на горизонтальной поверхности / И.А. Горпинич // Пожарная безопасность. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – Вып. 31. – С. 44-47.
2. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. шк., – 2002. – 671 с.

О.Є. Басманов, І.А. Горпинич

Розтікання рідини на негладкій поверхні при аварії на залізничному транспорті

Побудовано математичну модель, що описує динаміку гравітаційного розтікання рідини на негладкій поверхні при аварії на залізничному транспорті. Для випадку розтікання на сухому ґрунті експериментально визначено параметр моделі

Ключові слова: горюча рідина, розтікання, площа розливу.

O.E. Basmanov, I.A. Horpynych

Spreading of liquid on non-smooth surface after train accident

Mathematical model of liquids spill dynamics on horizontal non-smooth surface after train accident is constructed. Parameter of mode is experimentally determined for spreading on dry ground.

Keywords: flammable liquids, spill, square of spill.