

*А.Е. Басманов, докт. техн. наук, гл. научн. сотрудник, УГЗУ,
А.А. Михайлюк, адъюнкт, УГЗУ*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДНОЙ СТРУИ СО СТЕНКОЙ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

(представлено д-ром техн. наук Ю.А. Абрамовым)

Построена математическая модель течения водной пленки по вертикальной стенке после удара струи о нее. Получены оценки скорости стекания водной пленки и ее толщины.

Постановка проблемы. Пожар в резервуаре с нефтепродуктами характеризуется выделением значительного количества тепла и наличием высоких температур. Так, например, сухая стенка горящего резервуара нагревается до температуры порядка 800°C . В отсутствии охлаждения или его недостатке это приводит к деформации сухой стенки резервуара и образованию изолированных очагов горения, куда пену для тушения подать практически невозможно. Поэтому оценка необходимого количества воды невозможна без математической модели охлаждающего действия воды.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] рассмотрено взаимодействие водной струи со стенкой резервуара, при этом форма охлаждаемой поверхности и граница водной пленки после удара струи о стенку не рассматриваются. Вопросам струйного охлаждения в технологических аппаратах посвящена работа [4], но в ней подача воды осуществляется равномерно по всему периметру, так, что вся поверхность оказывается покрытой водной пленкой.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение оценок скорости движения водной пленки после удара, толщины водной пленки после удара струи о стенку и границы области охлаждения. Учитывая, что диаметр резервуара намного больше диаметра струи, будем пренебрегать кривизной боковой поверхности резервуара, рассматривая падение струи на плоскую стенку. После удара о стенку вода расходится и стекает вниз. При этом будем предполагать, что непосредственно после удара скорость движения воды равна скорости струи в момент удара w_0 .

Рассмотрим движение элементарного объема воды ΔV толщиной δ , шириной x , длиной Δu , находящегося в момент времени t в точке y и имеющего скорость w в вертикальном направлении (рис. 1).

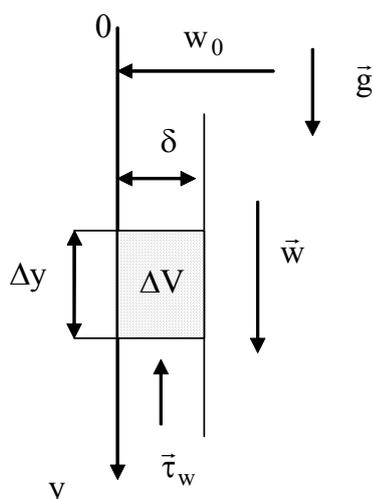


Рисунок 1 – Движение воды по стенке резервуара после удара струи, имеющей скорость w_0 (вид сбоку)

Этот объем испытывает сопротивление своему движению, вызванное вязким трением. При этом сила трения, которую испытывает элементарный объем воды ΔV протяженностью Δy определяется по формуле

$$F_{\text{тр}} = \tau_w \times \Delta y, \quad (1)$$

где x – ширина потока, стекающего по стенке, τ_w – касательное напряжение, Δy – протяженность элементарного потока.

Ускорение, вызванное силой трения, равно

$$a_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{тр}}}{m} = \frac{F_{\text{тр}}}{\Delta V \rho} = \frac{\tau_w \times \Delta y}{x \Delta y \delta \rho} = \frac{\tau_w}{\delta \rho}, \quad (2)$$

где m – масса рассматриваемого элементарного объема воды ΔV ; ρ – плотность воды; δ – толщина водной пленки. Согласно [2] касательное напряжение может быть выражено через число Рейнольдса Re

$$\tau_w = 0,0291 \rho w^2 Re^{-0,2}, \quad (3)$$

где w – скорость потока. Выражение для числа Рейнольдса для пленки имеет вид [3]: $Re = G/\mu$, где μ – кинематический коэффициент вязкости воды; G – массовый расход жидкости (кг/м·с) на еди-

ницу толщины пленки с расчетной толщиной δ : $G = \rho w \delta$, т.е. $G = V\rho/x$; V – объемный расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$).

Тогда число Рейнольдса равно

$$\text{Re} = \frac{\rho w \delta}{\mu} = \frac{w \delta}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – динамический коэффициент вязкости воды. В этом случае выражение для касательного напряжения примет вид

$$\tau_w = 0,0291 \rho w^{1,8} \left(\frac{\nu}{\delta} \right)^{0,2}. \quad (5)$$

Тогда

$$\frac{dw}{dt} = -a_{\text{тр}} + g. \quad (6)$$

Объединяя (2), (7) и (8), получим:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{0,0291}{\delta} \left(\frac{\delta}{\nu} \right)^{0,2} w^{1,8} + g, \quad (7)$$

$$\frac{dw}{dt} = -0,0291 \frac{\nu^{0,2}}{\delta^{1,2}} w^{1,8} + g. \quad (8)$$

Полученное дифференциальное уравнение с начальным условием $w(0) = w_0$ описывает движение элементарного объема воды вдоль вертикальной оси.

Толщина слоя δ может быть выражена через объемный расход воды V , скорость w и ширину потока x в данной точке:

$$\delta = \frac{V}{w} \cdot \frac{1}{x}. \quad (9)$$

Тогда

$$\frac{dw}{dt} = -0,0291 \frac{\nu^{0,2}}{V^{1,2}} w^{1,2} x^{1,2} w^{1,8} + g,$$

$$\frac{dw}{dt} = -0,0291 \frac{\nu^{0,2}}{V^{1,2}} w^3 x^{1,2} + g.$$

Поскольку $y' = w$, $y'' = \frac{dw}{dt}$, то последнее уравнение может быть записано в виде:

$$y'' = -0,0291 \frac{v^{0,2}}{V^{1,2}} (y')^3 y^{0,6} + g, \quad (10)$$

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = w_0. \quad (11)$$

Уравнение движения элементарного объема воды в горизонтальном направлении может быть записано аналогично уравнению (9) при $g = 0$. Проведя аналогичные выкладки и учитывая, что $x' = w$, $x'' = \frac{dw}{dt}$, получим:

$$x'' = -\frac{0,0291}{V^{1,2}} (y')^{1,2} x^{1,2} (x')^{1,8} v^{0,2}, \quad (12)$$

$$x(0) = 0, \quad x'(0) = w_0, \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений (10)-(13) приближенно описывает движение элементарного объема воды после удара струи о стенку. Речь идет о приближенном описании, т. к. после удара струи о стенку мгновенные скорости в действительности направлены в радиальных направлениях от точки удара и равны по модулю w_0 . А при течении водной пленки по стенке происходит их взаимодействие.

Совместное решение системы (10)-(13), например методом Эйлера, позволяет получить параметрическое представление границы области охлаждения:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (14)$$

В качестве примера на рис. 2 приведена граница области охлаждения при подаче воды стволами А и Б при давлении водяного столба 60м (расход 9 л/с и 4,5 л/с соответственно; $w_0 = 33$ м/с; коэффициент использования воды $k_s = 0,2$).

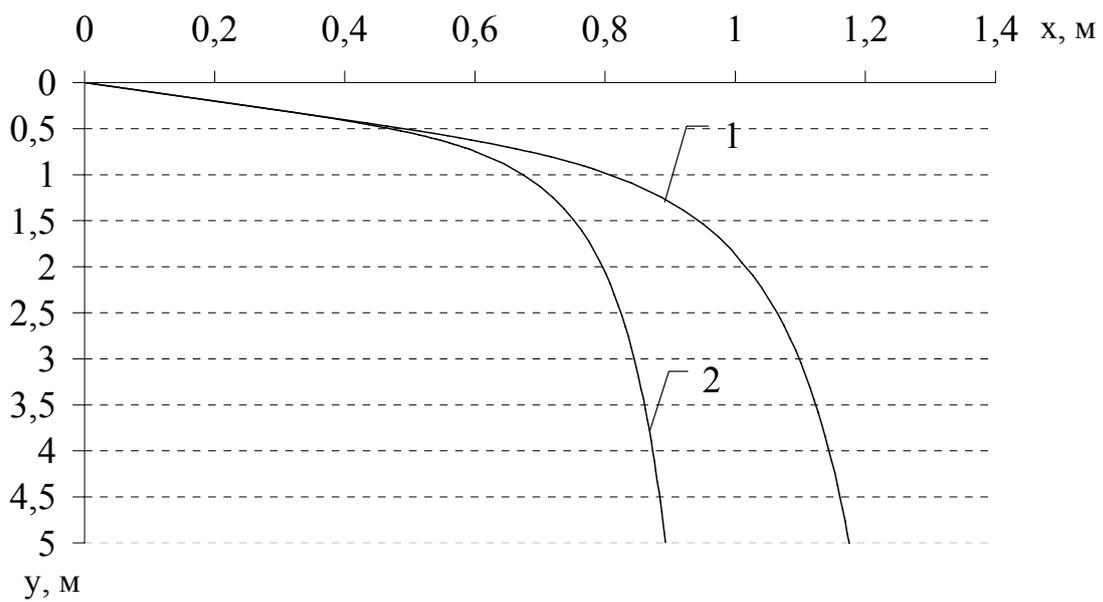


Рисунок 2 – Контур водной пленки после удара струи о стенку: 1 – ствол А; 2 – ствол Б

Полученное решение позволяет оценить скорость стекания водной пленки (рис. 3), а из формулы (9) ее толщину (рис.4).

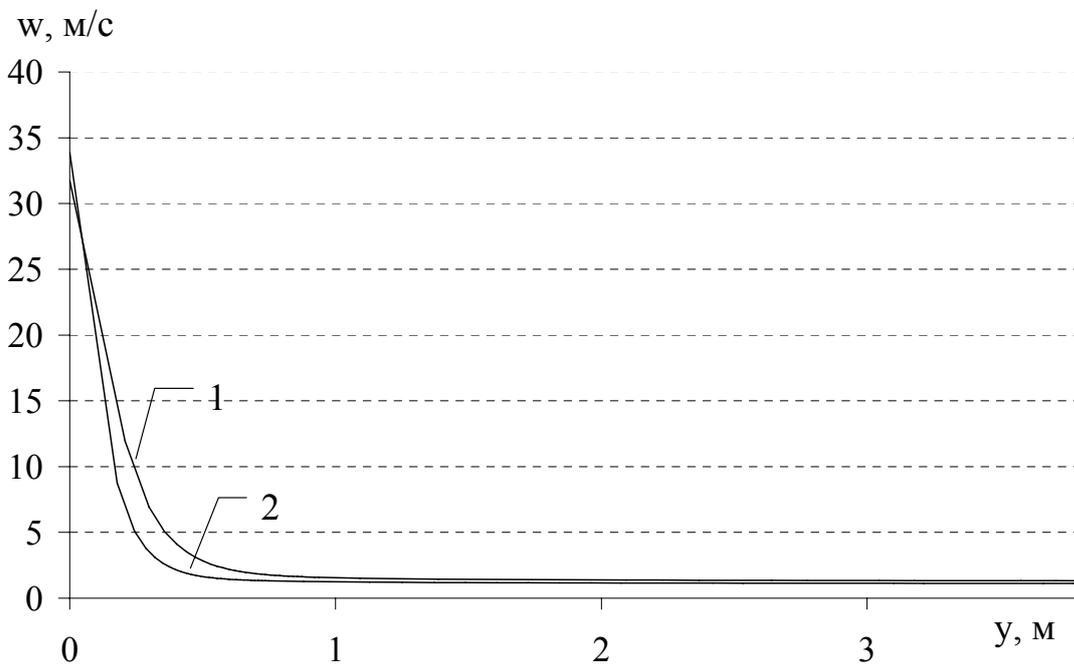


Рисунок 3 – Зависимость скорости движения водной пленки $w(y)$ от ее координаты: 1 – ствол А; 2 – ствол Б

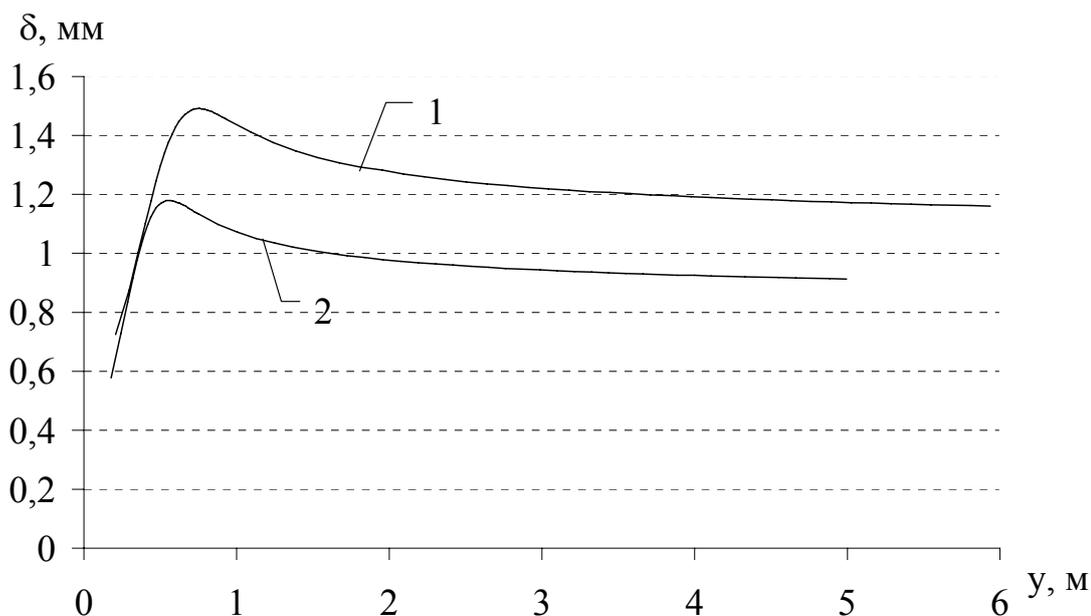


Рисунок 3 – Зависимость толщины водной пленки $\delta(y)$ от ее координаты: 1 – ствол А; 2 – ствол Б

Из рисунков 3, 4 видно, что под действием силы вязкого трения скорость стекания очень быстро выходит на постоянное значение, после чего толщина пленки меняется незначительно.

Выводы. Построена математическая модель течения водной пленки по вертикальной стенке после удара струи. Путем численного решения системы дифференциальных уравнений, получены оценки границы стекающей водной пленки, скорости ее движения и толщины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. – Харьков: УГЗУ, 2006. – 256 с.
2. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. Теплотехника. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.
3. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976 – 296 с.
4. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Методы расчета и исследования пленочных процессов. – Киев: Техника, 1975. – 311 с.
nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 18.03.2009 г.