

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ПОЛИМЕРА ПРИ РАКЕЛЬНОМ СПОСОБЕ НАНЕСЕНИЯ

В.И. Ольшанский, Р.В. Окунев

УДК 677.4

### РЕФЕРАТ

*ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ЩЕЛЬ, СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ, ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ОБЪЕМНЫЙ РАСХОД*

*Объектом исследования является процесс истечения вязкой несжимаемой жидкости через плоское щелевое отверстие под действием сил гидростатического давления.*

*Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.*

*Установлено, что изменение скорости течения вязкой несжимаемой жидкости при ламинарном режиме подчиняется параболическому закону. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить величину гидростатического давления для обеспечения необходимой производительности и толщины покрытия при производстве различных искусственных материалов.*

### ABSTRACT

*LAMINAR FLOW, SLOT, FLOW VELOCITY ( ИЛИ FLOW SPEED), HYDROSTATIC PRESSURE, VOLUME FLOW*

*The authors have examined the regularity of changing liquid polymers flow velocity through a flat hole when multilayered composite materials are produced. The analytic dependence of hydrostatic pressure and its geometrical parameters allowing to define the liquid polymers flow velocity and flow line capability for the production of different multilayered composite materials are obtained.*

### ВВЕДЕНИЕ

При производстве различных многослойных материалов (обоев, искусственных кож) широко применяется ракель, который представляет собой устройство с плоской щелью, через которое происходит истечение жидкости под действием гидростатического давления на непрерывно движущуюся поверхность или основу.

Технологические режимы, обеспечивающие качественное нанесение, устанавливаются или эмпирически, или на основе методов математического планирования многофакторного эксперимента.

До настоящего времени отсутствует аналитическая зависимость, позволяющая на стадии проектирования определять технологические и

геометрические параметры ракеля при производстве различных материалов.

Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим установившееся ламинарное движение вязкого несжимаемого полимера в плоском зазоре ракеля толщиной  $\delta$ , шириной  $b$  (рисунок 1) и длиной  $l$ .

Введем систему координат  $ZOX$  и обозначим:

$P_0$  – давление на поверхности резервуара с полимером;  $\rho_{ж}$  – плотность полимера;  $H_r$  – гео-

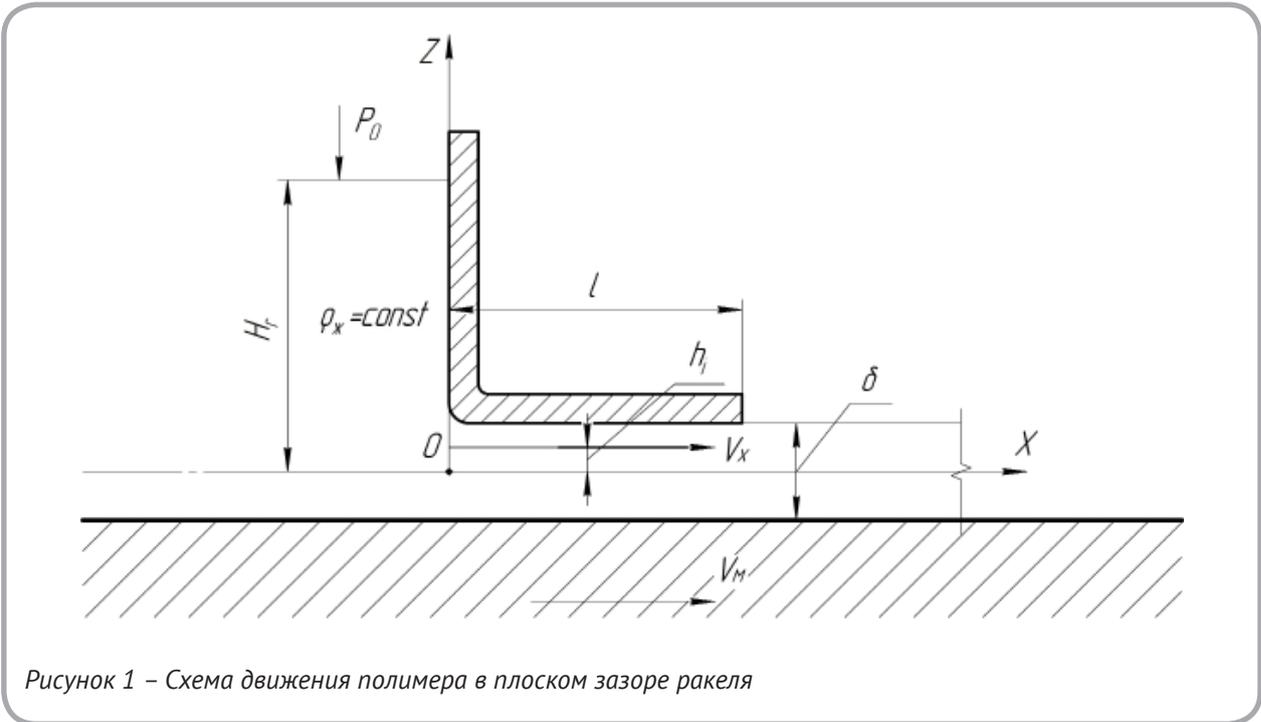


Рисунок 1 – Схема движения полимера в плоском зазоре ракеля

метрическая высота от поверхности резервуара до оси  $OX$ ;  $h_i$  – текущая координата скорости  $V_x$ ;  $V_M$  – скорость движения материала, на которую наносится полимер;  $V_x$  – текущая скорость движения полимера.

Ламинарное течение жидкости в зазоре ракеля является слоистым, поэтому составляющие скорости  $V_y$  и  $V_z$  равны нулю. Решение задачи по определению закона изменения скорости  $V_x$  под действием гидростатического давления  $(P_0 + \rho_{ж} g H_r) = const$  выполняется в два этапа. На первом этапе будем рассматривать движение жидкостного полимера под действием гидростатического давления  $((P_0 + \rho_{ж} g H_r) = const)$  при условии, что  $V_M = 0$ . На втором этапе учтем значение скорости,  $V_M$  считая, что её изменение по толщине ракеля имеет линейный характер.

Тогда при условии  $V_M = 0$ , скорость  $V_x = 0$  при  $h_i = -\frac{\delta}{2}$  и при  $h_i = \frac{\delta}{2}$ .

Равномерное ламинарное течение будет выполняться при условии  $F_D \geq F_C$ , где  $F_C = -\mu S \frac{dV_x}{dh}$  [1].

Уравнение равномерного ламинарного течения вязкого несжимаемого полимера, в проекции на ось  $OX$  имеет вид:

$$(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i b \geq -\mu S \frac{dV_x}{dh}, \quad (1)$$

где  $S = l \cdot b$  площадь ламинарного слоя на глубине (высоте)  $h_i$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость полимера (Па · с).

С учетом этого значение  $S$  уравнение (1) имеет вид:

$$(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i b \geq -\mu l b \frac{dV_x}{dh}. \quad (2)$$

Разделяя переменные, дифференциальное уравнение (2) имеет вид:

$$dV_x = -\frac{(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i dh}{\mu l}. \quad (3)$$

Интегрируя, получим

$$V_x = -\frac{(P_0 + \rho_{ж} g H_r) h_i^2}{2\mu l} + C. \quad (4)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из граничных условий.

При  $h_i = \pm \frac{\delta}{2}$ ;  $V_x = 0$ , тогда

$$C = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{8\mu} \quad (5)$$

Подставляя значение  $C$  в уравнение (4), получим

$$V_x = \frac{\delta^2}{8\mu} (P_0 + \rho_{жк} g H_r) - \frac{h_i^2}{2\mu} (P_0 + \rho_{жк} g H_r) \quad (6)$$

или

$$V_x = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} (\delta^2 - 4h_i^2) \quad (7)$$

Максимальное значение скорости  $V_x = V_{xmax}$  будет при  $h_i = 0$ , то есть в центре живого сечения потока

$$V_{xmax} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{8\mu} \quad (8)$$

Уравнение закона изменения скорости  $V_x$  показывает, что скорость истечения жидкого вязкого несжимаемого полимера имеет параболический характер (рисунок 2).

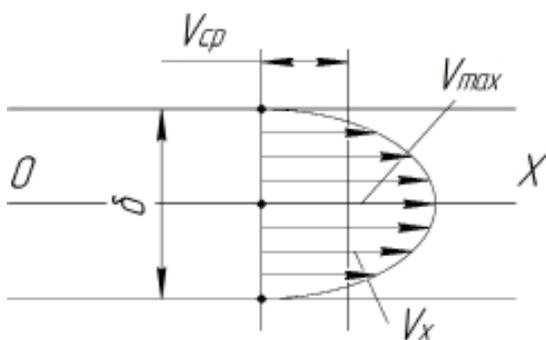


Рисунок 2 - Характер истечения вязкого несжимаемого полимера

Среднее значение скорости, по теореме о среднем равно

$$V_{cp} = \frac{1}{2} V_{max}; V_{cp} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{16\mu} \quad (9)$$

Рассмотрим движение жидкого несжимаемого полимера в плоском зазоре ракеля только

при наличии  $V_M$  (рисунок 3) (второй этап).

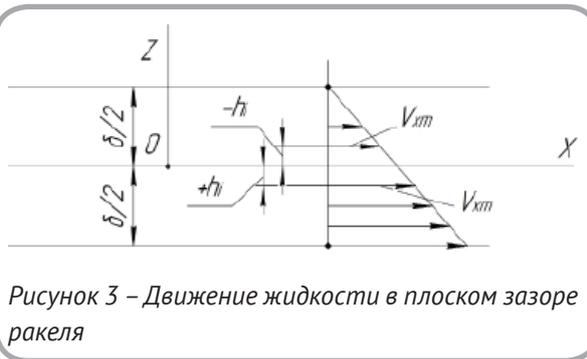


Рисунок 3 - Движение жидкости в плоском зазоре ракеля

$V_{xM}$  – текущее значение скорости в проекции на ось  $Ox$  при скорости материала  $V_M$ . Из условия подобия скоростей, получим

$$V_{xM} = \frac{(0,5\delta \pm h_i) V_M}{\delta} \quad (10)$$

При  $h_i = -\frac{\delta}{2}$   $V_{xM} = 0$ .

При  $h_i = \frac{\delta}{2}$   $V_{xM} = V_M$

Среднее значение скорости  $V_{xM} = V_{Mcp}$  будет при  $h_i = 0$ ,  $V_{Mcp} = 0,5V_M$

Закон изменения скорости течения жидкого вязкого и несжимаемого полимера при ракельном способе нанесения, будет иметь вид:

$$V_x = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} (\delta^2 - 4h_i^2) + \frac{V_M (0,5\delta \pm h_i)}{\delta} \quad (11)$$

Максимальное значение скорости

$$V_{xmax} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r)}{8\mu} + 0,5V_M \quad (12)$$

Среднее значение скорости течения жидкого несжимаемого вязкого полимера равно:

$$V_{cp} = \frac{(P_0 + \rho_{жк} g H_r) \delta^2}{16\mu} + 0,5V_M \quad (13)$$

Величина объемного расхода при ракельном способе нанесения полимера равна:

$$Q = V_{cp} \cdot \omega \quad (14)$$

где  $\omega = \delta \cdot b$  – площадь живого сечения потока жидкого полимера.

С учетом (13) получим

$$Q = \left[ \frac{(P_0 + \rho_{жс} g H_r) \delta^2}{16 \mu l} + 0,5 V_M \right] \cdot \delta b, \quad (15)$$

где  $V_{cp} = V_M$  – скорость транспортирования материала или секундная производительность, (м/с).

Массовый расход равен:

$$Q_0 = Q \cdot \rho_{жс} \left[ \frac{(P_0 + \rho_{жс} g H_r) \delta^2}{16 \mu l} + 0,5 V_M \right] \cdot \rho_{жс} \delta b. \quad (16)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уравнение (16) позволяет решать ряд технологических задач. Например, при заданном расходе  $Q$  или  $Q_0$ , известной конструкции ракеля, то есть известных его геометрических параметров; зная тип полимера и его вязкость, определить скорость транспортирования  $V_M$ , для получения заданной толщины покрытия  $\delta$ .

Для реального технологического процесса производства материала с ПВХ покрытием на тканевой основе определим величину гидростатического напора  $P_0 + \rho_{жс} g H_r$  по заданной производительности  $\Pi = V_M$  и толщине покрытия  $\delta$ . Вначале определим массовую производительность по формуле

$$Q_0 = V_M \cdot \delta \cdot b \cdot \rho_{жс}. \quad (17)$$

Из формулы (16) определим величину гидростатического напора:

$$P_0 + \rho_{жс} g H_r = \frac{16 \mu l}{\delta^2} \left( \frac{Q_0}{\rho_{жс} \delta b} - 0,5 V_M \right). \quad (18)$$

При  $P_0 = P_a$  из формулы (18) определим величину гидростатического давления:

$$H_r = \frac{16 \mu l}{\rho_{жс} g \delta^2} \left( \frac{Q_0}{\rho_{жс} \delta b} - 0,5 V_M \right). \quad (19)$$

Проведем расчет и определим величину столба жидкости.

Исходные данные для расчета:

- динамическая вязкость полимера для производства водоогнетермостойких материалов  $\mu = 27,1 \cdot 10^{-3}$  Па·с;
- линейный размер ракеля  $l = 0,0025$  м;
- объемная плотность при необходимой динамической вязкости  $\rho = 390,1$  кг/м<sup>3</sup>;
- ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;
- толщина наносимого слоя  $\delta = 0,0003$  м;
- ширина ракеля  $b = 1,55$  м;
- скорость транспортирования  $V_M = 0,35$  м/с.

Объемная производительность

$$Q_0 = 0,35 \cdot 0,0003 \cdot 1,55 \cdot 390,1 = 0,06 \text{ кг/с.}$$

Величина высоты столба жидкости:

$$H_r = \frac{16 \cdot 27,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0025}{390,1 \cdot 9,81 \cdot 0,0003^2} \cdot \left( \frac{0,06}{390,1 \cdot 0,0003 \cdot 1,55} - 0,5 \cdot 0,35 \right) = 0,49 \text{ м}$$

Полученные результаты расчета величины столба гидростатического давления  $H_r = \text{const}$  переданы для производства на производственном унитарном предприятии «Гомельобои» (Акт выпуска опытно-промышленной партии материала верха с полимерным покрытием (комбинированного материала с полимерным металлизированным покрытием) от 05 сентября 2013 г.). Высота столба полимера в реальных условиях при производстве комбинированного материала с полимерным металлизированным покрытием составляет 0,5 м.

Полученное значение высоты столба жидкости, реализуемое на производстве, соответствует высоте столба полимера, что свидетельствует о достоверности приведенных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ

1. Альтшуль, А.Д. и др. (1987), *Гидравлика и аэродинамика*, Москва, 414 с.

REFERENCES

1. Altschul, A.D. et al. (1987), *Gidravlika i ajerodinamika* [Hydraulics and Aerodynamics], Stroyizdat, Moscow, 414 p.

*Статья поступила в редакцию 16. 10. 2014 г.*