

СБОР НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН ВРАЩАЮЩИМСЯ БАРАБАНОМ

Федоров С.В. (Хусаинова Г.Я., к.ф.-м.н., доцент,
СФ БГУ, Стерлитамак)

Аннотация. В данной работе рассмотрено численное моделирование процесса сбора нефтяных пятен вращающимся барабаном. Проведен численный эксперимент.

Ключевые слова: нефтяные пятна, барабанный сборщик, численный эксперимент.

К настоящему времени один из основных методов технологического сбора нефтяных пятен с поверхности водоемов и рек основан на явлении увлечения пленок вращающимся барабаном [1]. Настоящая работа посвящена некоторым особенностям течения в процессе разделения пленки нефти от воды с помощью вращающегося цилиндра, поверхность которого хорошо смачивается с жидкостью в пленке.

На рис.1 приведена схема барабанного сборщика. Нижняя часть барабана частично находится в жидкости (степень погружения определяется углом φ_0). Пусть невозмущенная толщина пленки равна h_∞ (толщина пленки в достаточном удалении от барабана), а скорость ее движения относительно оси барабана равна v_∞ . Тогда для объемного расхода пленки, поступающего к барабану, отнесенной к единице его длины, имеем $m = h_\infty v_\infty$.

Поскольку поверхность барабана хорошо смачивается с жидкостью в пленке, то на поверхности вращающегося барабана происходит полный захват и увлечение этой жидкости, что способствует разделению пленки от воды. В связи с этим допущением, захватом воды барабаном пренебрегаем и считаем, что происходит увлечение только пленки нефти.

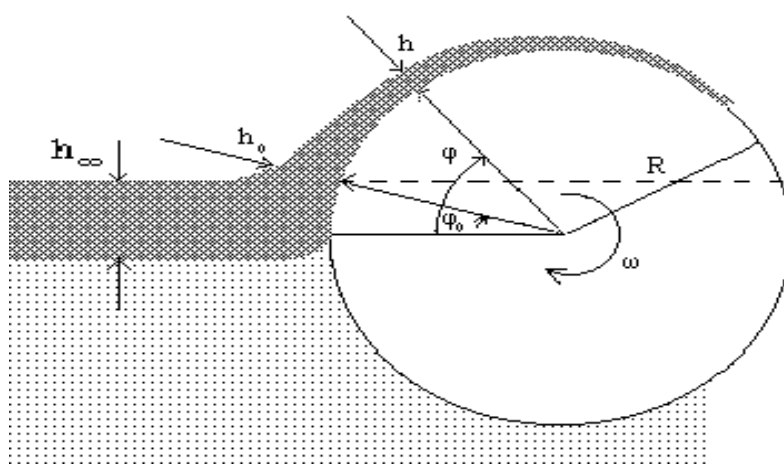


Рис.1а. Схематическое представление барабанного сборщика

В рамках выше принятых гипотез, теоретическое моделирование процесса увлечения пленки движущейся поверхностью сводится построению решений уравнений вязкой жидкости. Для этого запишем уравнения неразрывности и Навье-Стокса для установившегося течения движения жидкой пленки в зоне увлечения с учетом силы тяжести в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad -\frac{\partial P}{\partial r} - \rho g \sin \varphi = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_r V_\varphi}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} - \rho g \cos \varphi = 0. \quad (2)$$

На поверхности барабана ($r=R$) будем полагать условие прилипания, которое запишется в виде:

$$V_\varphi = \omega R \quad (r=R). \quad (3)$$

На внешней поверхности пленки с толщиной h примем условие отсутствия касательных напряжений:

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = 0 \quad (r=R+h). \quad (4)$$

Это условие вполне оправдано для границы раздела пленка – газ, так как динамическая вязкость газа на порядок меньше вязкости жидкости.

Общие решения системы (1) и (2) при условии (3) и (4) не найдено. Но для рассматриваемой проблемы имеет смысл рассмотреть случай достаточно медленных ползучих течений, когда силы инерции несущественны. Для этой ситуации, когда силы инерции много меньше сил вязкого трения ($Re \ll 1$, $Re = \rho \omega R h_0^* / \mu$), уравнение движения (2) примет вид:

$$\mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} - \rho g \cos \varphi = 0. \quad (5)$$

Двукратным интегрированием, учитывая при этом условия отсутствия касательных напряжений (4) и прилипания (3), можем получить выражение для распределения скорости поперек пленки:

$$V_\varphi = \frac{\rho g \cos \varphi}{2\mu} (r^2 - R^2) + \frac{\rho g \cos \varphi}{\mu} (R+h)(R-r) + \omega R. \quad (6)$$

При стационарном режиме работы барабана объемный расход поступления пленки m и скорость пленки на поверхности барабана должны быть связаны уравнением

$$\int_R^{R+h} V_\varphi dr = m. \quad (7)$$

Используя (6), на основе (7) получим уравнение, описывающее распределение толщины пленки h на поверхности барабана в зависимости от расхода поступления нефти m :

$$-\frac{g \rho \cos \varphi}{\mu} \frac{h^3}{3} + \omega R h = m. \quad (8)$$

Запишем уравнение (7) для передней кромки барабана:

$$m = -\frac{g \rho \cos \varphi_0}{\mu} \frac{h_0^3}{3} + \omega R h_0. \quad (9)$$

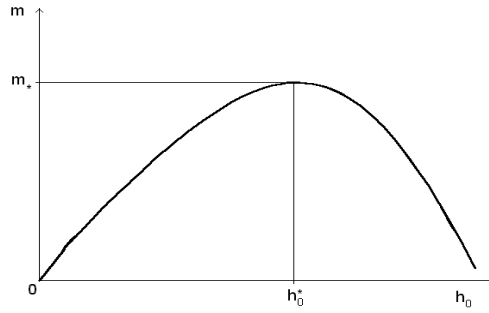


Рис.2. Характерная зависимость расхода m от толщины пленки на передней кромке h_0 . (m , $\text{м}^2/\text{с}$, h_0 , м)

Из анализа этого выражения следует, что зависимость расхода m от h_0 (рис.2) имеет две ветви, а именно монотонно возрастающую при росте h_0 до h_0^* и монотонно убывающую при дальнейшем росте h_0 ($h_0 > h_0^*$). Анализ показывает, что вторая ветвь физически не реализуема (при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ толщина пленки на поверхности барабана стремится к бесконечности).

Значение h_0^* , при котором расход максимален, находим из условия

$$\frac{dm}{dh_0} = -\frac{g\rho \cos\varphi_0}{\mu} h_0^2 + \omega R = 0. \quad (10)$$

Отсюда для его значения получим

$$h_0^* = \sqrt{\frac{\omega R \mu}{\rho g \cos\varphi_0}}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (9), можем найти максимальную производительность барабанного сборщика шириной L

$$M^* = \frac{2}{3} L \sqrt{\frac{(\omega R)^3 \mu}{\rho g \cos\varphi_0}}, \quad (12)$$

которая может реализоваться при заданной скорости вращения ω , радиуса R и уровня затопленности барабана в воде, определяемым углом φ_0 .

Приведем численный пример. Для барабана с параметрами $L=2$ м, $R=0,2$ м, $\omega=3,14$ с^{-1} , $\varphi_0=0$ и жидкости в пленке при $\mu=15$ Па*с, $\rho=850$ $\text{кг}/\text{м}^3$ будем иметь $h_0^* \approx 3$ см.

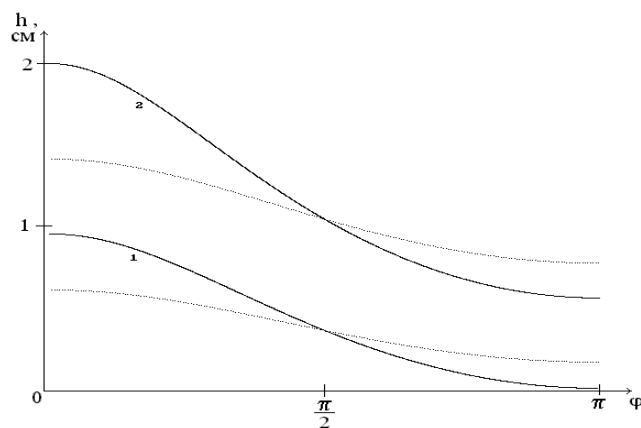


Рис.3. Распределение толщины пленки по поверхности барабана при разных расходах жидкости. (h , см, φ , рад)

На рис.3 иллюстрируется распределение толщины пленки по поверхности барабана при разных расходах жидкости (линии 1,2 соответствуют $m=0,009, 0,008 \text{ м}^2/\text{с}$). Параметры барабана те же, что и на вышерассмотренном примере. Сплошная и пунктирная линии соответствуют вязкости жидкости $\mu=9$ и $18 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Литература

1. Шагапов В.Ш., Хасанов И.Ю., Хусаинова Г.Я. Моделирование процесса удаления нефти с поверхности воды методом прилипания. Экологические системы и приборы. 2003. № 5. С. 33.
2. Хусаинова Г.Я. Моделирование сбора нефтяных пятен с поверхности воды // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 1. № 5. С. 68-70.