

УДК 532.546

ГИДРОДИНАМИКА СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА РОТОРЕ АДГЕЗИОННОГО НЕФТЕСБОРЩИКА

А. И. Филиппов, Т. А. Ишмуратов

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. З. Бишевой,
453104 Стерлитамак
E-mail: psi0nix@mail.ru

Предложена приближенная модель описания гидродинамических процессов в стационарной постановке при течении вязкой жидкости на вращающемся движущемся цилиндре. Найдены выражения для критических и оптимальных толщин слоев жидкости, определены условия существования вала перед движущимся цилиндром. На основе полученных решений найдены зависимости между физическими и геометрическими параметрами для роторного адгезионного нефтесборщика.

Ключевые слова: барабанный нефтесборщик, адгезия, критический режим, уравнение Навье — Стокса, течение в слое.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных магистральных нефте- и продуктопроводов, морских и речных судов показывает, что, несмотря на высокие требования, предъявляемые к их надежности, и большие финансовые затраты на своевременное и качественное техническое обслуживание, безотказная работа этих объектов невозможна. Особую опасность представляют подводные переходы, протяженность которых составляет приблизительно 2 % общей протяженности магистралей.

Одним из наиболее перспективных способов ликвидации последствий аварий, связанных с утечкой нефти, является ее сбор с поверхности водоемов с помощью вращающегося барабана или транспортера, в котором захват нефтепродукта осуществляется за счет адгезионных свойств поверхности. Вследствие сложности гидродинамических процессов, происходящих в барабанном нефтесборщике, в настоящее время их математическое описание отсутствует.

Сложность соответствующих задач обусловлена наличием свободной поверхности, форма которой определяется в процессе решения задачи. В настоящей работе определены условия захвата нефтяной пленки на поверхностях, соответствующих нулевой скорости точек свободной поверхности и оптимальной производительности нефтесборщика, а также учтено дополнительное слагаемое в формуле для касательного напряжения.

На рис. 1 приведена схема барабанного сборщика, движущегося со скоростью v_0 относительно нефтяного пятна в воде (φ_0 — начальный угол; h_n — начальная толщина нефтяной пленки, соответствующая углу φ_0 ; e_φ , e_r , e_z — базисные векторы цилиндрической системы координат; R — радиус барабана). Вращающийся с угловой скоростью ω барабан нефтесборщика частично погружен в жидкую среду на глубину $R + H$.

Задача заключается в определении стационарного поля скоростей в инерциальной системе отсчета, движущейся равномерно вместе с осью барабана, в собираемом слое нефте-

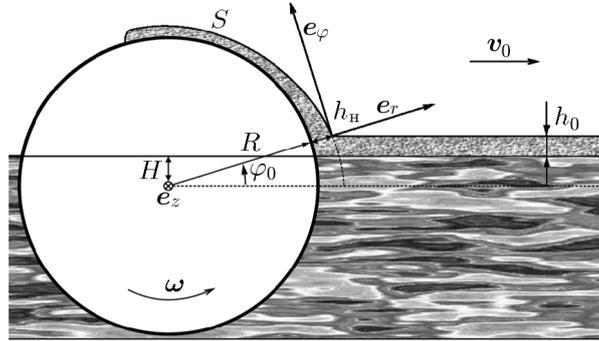


Рис. 1. Геометрия задачи

продукта, поэтому поле скоростей воды, обтекающей цилиндр снизу, не рассматривается. В такой системе относительное движение цилиндра является только вращательным.

Задача о сборе нефтепродуктов с поверхности водоемов решается в цилиндрических координатах с осью z , направленной вдоль оси цилиндра. На достаточном удалении от торцов ротора нефтесборщика движение собираемой несжимаемой жидкости определяется координатами r, φ и описывается уравнениями Навье — Стокса [1]

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} - \frac{\nu v_r}{r^2} - \frac{2\nu}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - g \sin \varphi; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{\nu v_\varphi}{r^2} + \frac{2\nu}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - g \cos \varphi \quad (2)$$

и уравнением неразрывности

$$\frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (3)$$

(v_r, v_φ — компоненты вектора скорости).

Граничные условия на поверхности нефтесборщика соответствуют прилипанию жидкости к поверхности: $v_\varphi|_{r=R} = \omega R, v_r|_{r=R} = 0$. Нормальная компонента тензора напряжений представляется в виде $\sigma_{rr} = -P + 2\eta \partial v_r / \partial r$ и на поверхности жидкости S равна атмосферному давлению: $\sigma_{rr}|_{r=R+h} = P_0$. Тангенциальная компонента напряжения $\sigma_{r\varphi} = \eta(r^{-1} \partial v_r / \partial \varphi + \partial v_\varphi / \partial r - v_\varphi / r)$ на той же поверхности равна нулю, поскольку воздух не создает упругих сдвиговых сил. Форма поверхности нефтяного слоя S (см. рис. 1) также находится из дополнительных условий, рассмотренных ниже.

Будем считать, что толщина слоя захватываемого битума h значительно меньше радиуса нефтесборщика R ($h/R \ll 1$). В этом случае линии тока почти параллельны поверхности нефтесборщика и радиальную составляющую скорости можно считать равной нулю: $v_r = 0$. С учетом этого слагаемыми $v_r \frac{\partial v_r}{\partial r}, \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}, \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right), \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2}, v_r \frac{\partial v_r}{\partial r}, \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}, \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right), \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}, \frac{\nu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right), \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2}, \frac{\nu v_r}{r^2}, v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r}, \frac{v_r v_\varphi}{r}, \frac{2\nu}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}$ в уравнениях (1), (2) можно пренебречь. В предположении малости толщины нефтяной пленки

можно считать, что координата r имеет большие значения, поскольку $r > R$ и слагаемыми $\frac{2\nu}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}$, $\frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}$, $\frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2}$, $\frac{\nu v_\varphi}{r^2}$ в уравнениях (1), (2) также можно пренебречь. Нетрудно показать, что указанные предположения обеспечивают приближенное выполнение уравнения неразрывности (3). Поэтому предлагаемая ниже теория является приближенной, однако ее точность возрастает с увеличением r и уменьшением φ .

С уменьшением толщины слоя собираемой нефтяной пленки все большее влияние на нее оказывают капиллярные явления, возникающие в зоне перехода пленки с поверхности воды. Вследствие того что радиус кривизны на порядок больше толщины нефтяной пленки и по мере погружения барабана в воду он увеличивается, капиллярные явления не оказывают существенного влияния на толщину набегаемой на барабан нефтяной пленки.

Условие для градиента скорости на поверхности в выражении для касательного напряжения имеет вид $(\partial v_\varphi / \partial r)|_{r=R+h} = (v/r)|_{r=R+h}$. Условие для нормального напряжения на границе контакта S собираемого битума и воздуха принимает вид $P|_{r=R+h} = P_0$, поскольку $\partial v_r / \partial r = 0$.

В случае длительной работы нефтесборщика движение жидкости является установившимся. В пренебрежении квадратичными слагаемыми, пропорциональными v^2/r , постановка задачи имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + g \sin \varphi = 0; \quad (4)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - gr \cos \varphi = 0; \quad (5)$$

$$v|_{r=R} = \omega R, \quad (R+h) \frac{\partial v}{\partial r} \Big|_{r=R+h} = v|_{r=R+h}, \quad P|_{r=R+h} = P_0. \quad (6)$$

Общее решение для поля давлений собираемой нефти можно получить путем интегрирования уравнения (4):

$$P = -\rho g r \sin \varphi + \tilde{P}(\varphi). \quad (7)$$

Здесь $\tilde{P}(\varphi)$ — функция давления, зависящая от угловой координаты φ и определяющаяся из условия $P|_{r=R+h} = P_0$. Окончательно выражение (7) можно записать в виде

$$P = \rho g (h + R - r) \sin \varphi + P_0. \quad (8)$$

Для нахождения поля скоростей необходимо продифференцировать уравнение (8) по координате φ и подставить в уравнение (5):

$$-g(h + R) \cos \varphi + \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0. \quad (9)$$

Проинтегрировав уравнение (9) по радиальной координате r , получаем

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{g}{\nu} (h + R) \cos \varphi + \frac{C_1}{r}. \quad (10)$$

С учетом условия $v|_{r=R} = \omega R$ из (10) находим выражение для поля скорости

$$v = \omega R + (g/\nu)(h + R)(r - R) \cos \varphi + C_1 \ln(r/R). \quad (11)$$

Константа C_1 определяется из условия для градиента скорости (6):

$$C_1 = \frac{\omega R - (g/\nu)(h + R)R \cos \varphi}{1 - \ln(1 + h/R)}. \quad (12)$$

Таким образом, выражение для поля скоростей принимает вид

$$v = \omega R \lambda(r) + (g/\nu)(h + R)[r - R\lambda(r)] \cos \varphi, \quad (13)$$

где

$$\lambda(r) = 1 + \frac{\ln(r/R)}{1 - \ln(1 + h/R)} = \frac{\ln[er/(R + h)]}{\ln[eR/(R + h)]}.$$

С учетом малости значений величины $x = r - R$ множитель в квадратных скобках выражения (13) можно представить в виде

$$\begin{aligned} r - R\lambda(r) &= r - R \left(1 + \frac{\ln(1 + x/R)}{1 - \ln(1 + h/R)} \right) \approx r - R \left[1 + \left(\frac{x}{R} - \frac{x^2}{2R^2} \right) \left(1 + \frac{h}{R} \right) \right] = \\ &= (h + R) \left[\frac{r}{h + R} - \left(\frac{R}{h + R} + \frac{x}{R} - \frac{x^2}{2R^2} \right) \right] = \frac{h + R}{2R^2} (x^2 - 2hx) = \frac{h + R}{2R^2} (r - R)(r - R - 2h). \end{aligned}$$

Тогда поле скоростей определяется выражением

$$v = [g/(2\nu)](r - R)(r - R - 2h) \cos \varphi + \omega R, \quad (14)$$

которое при $h/R \ll 1$ согласуется с решениями, приведенными в [2–5].

С использованием решений (13), (14) можно определить форму свободной поверхности и найти условия захвата. Покажем это на примере упрощенного решения (14).

Масса жидкости, увлекаемой в единицу времени через поперечное сечение, соответствующее углу $\varphi = \varphi_0$, определяется путем интегрирования (14) в пределах от R до $R + h_{\text{н}}$:

$$Q = \rho h_{\text{н}} (\omega R - g \cos \varphi_0 h_{\text{н}}^2 / (3\nu)). \quad (15)$$

В силу уравнения неразрывности величина $Q = v_0 h_0$ является постоянной при любых φ . Используя (15), получаем неявную зависимость толщины слоя жидкости h от угла φ

$$\varphi = \arccos [3\nu(\omega R - v_0 h_0 / h) / (g h^2)].$$

При проведении анализа гидродинамических процессов, происходящих при движении жидкости по поверхности барабана, целесообразно определить форму критической поверхности над барабаном, на которой скорость точек обращается в нуль, поскольку согласно зависимости (14) скорость v убывает с увеличением r и может принимать отрицательные значения (рис. 2). Расстояния от точек, в которых скорость обращается в нуль, до поверхности вращающегося цилиндра будем называть критической толщиной $h_{\text{кр}}$. Очевидно, что $h_{\text{кр}}$ является функцией угловой координаты φ и определяет предельно возможное значение толщины слоя, поскольку отрицательные значения скорости исключают попадание точек пленки в слой, увлекаемый поверхностью барабана. Для определения этой зависимости в (14) будем полагать $r - R = h_{\text{кр}}$, $h = h_{\text{кр}}$. Тогда из условия $v = 0$ получим выражение для критической толщины слоя нефтепродукта

$$h_{\text{кр}} = \sqrt{2\omega R\nu / (g \cos \varphi)}. \quad (16)$$

Результаты анализа полученного выражения показывают, что в интервале $0 < \varphi < \pi/2$ критическое значение толщины увеличивается с $\sqrt{2\omega R\nu/g}$ до бесконечности (рис. 3).

В интервале углов $\pi/2 < \varphi < \pi$ $\cos \varphi$ принимает отрицательные значения, поэтому значения $h_{\text{кр}}$ становятся мнимыми. Это означает, что в данном диапазоне угловых координат нулевые значения скорости не реализуются. Вычисление критических толщин $h_{\text{кр}}(\varphi)$ имеет большое значение при анализе работы нефтесборщика, поскольку позволяет определить так называемые условия захвата жидкости барабаном нефтесборщика.

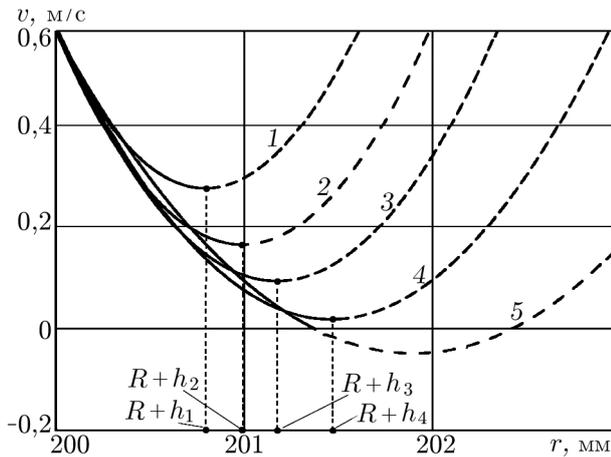


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость скорости v в слое от радиальной координаты r при различных значениях φ :

1 — $\varphi = \pi/3$, 2 — $\varphi = \pi/4$, 3 — $\varphi = \pi/5$, 4 — $\varphi = \pi/6$, 5 — $\varphi = \pi/10$; h_1 – h_4 — толщины пленки, соответствующие различным углам φ ; штриховые линии — область отрицательных скоростей

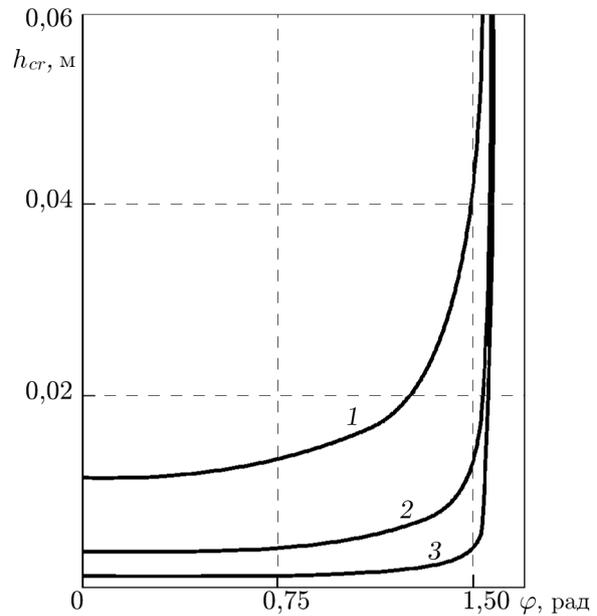


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость критической толщины слоя h_{cr} от угловой координаты φ при различных значениях ν :

1 — $\nu = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 — $\nu = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 — $\nu = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

При малых толщинах слоя собираемой жидкости h_0 и больших значениях угловой скорости барабана ω реализуется докритический режим работы нефтесборщика (рис. 4, а), при котором захват собираемой жидкости осуществляется при углах $\varphi = \varphi_0$. Значение начальной толщины захвата h_{cr} определяется уравнением неразрывности

$$v_0 h_0 = h_n (\omega R - g \cos \varphi_0 h_n^2 / (3\nu)). \quad (17)$$

При достижении критической толщины слоя $h_n = h_{cr}$ вследствие увеличения толщины набегающего слоя или уменьшения угловой скорости барабана скорость в точке А обращается в нуль. Дальнейшее увеличение толщины собираемой пленки происходит за счет изменения угла захвата φ до соответствующего критического значения φ_{cr} , определяемого соотношениями

$$v_0 h_0 = h_{cr} (\omega R - g \cos \varphi_{cr} h_{cr}^2 / (3\nu)), \quad h_{cr} = \sqrt{2\omega R \nu / (g \cos \varphi_{cr})}. \quad (18)$$

В сверхкритическом режиме барабан не может увлечь всю собираемую нефть без изменения угла φ_0 , который определяется толщиной невозмущенного слоя собираемой нефти. В этом случае перед ротором нефтесборщика образуется вал (рис. 4, б), что приводит к увеличению толщины захватываемой пленки до значения $h_n = h_{cr}$. Поскольку согласно (16) с увеличением угла φ значение h_{cr} возрастает, при той же скорости вращения производительность нефтесборщика увеличивается. Положение точки захвата в сверхкритическом режиме над уровнем собираемой жидкости определяется соотношением $\Delta h_{cr} = R(\sin \varphi_{cr} - \sin \varphi_0) = R \sin \varphi_{cr} - h_0 - H$. Выражение для косинуса

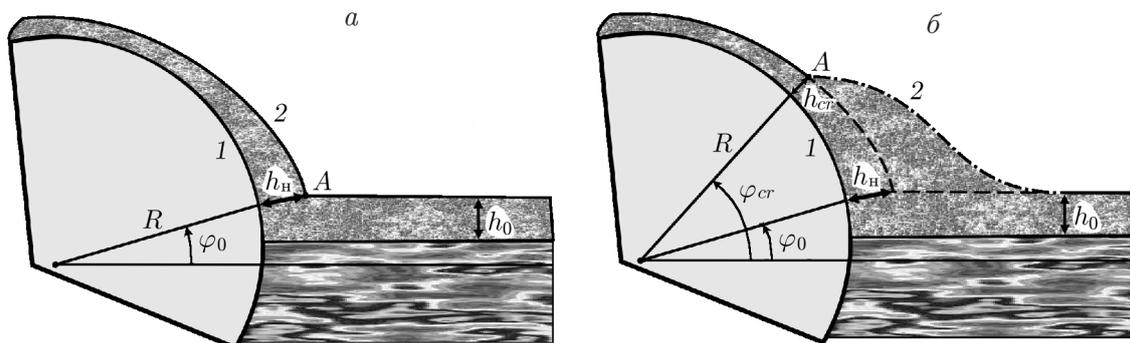


Рис. 4. Докритический (а) и сверхкритический (б) режимы работы нефтесборщика: 1 — поверхность барабана нефтесборщика, 2 — поверхность собираемой жидкости

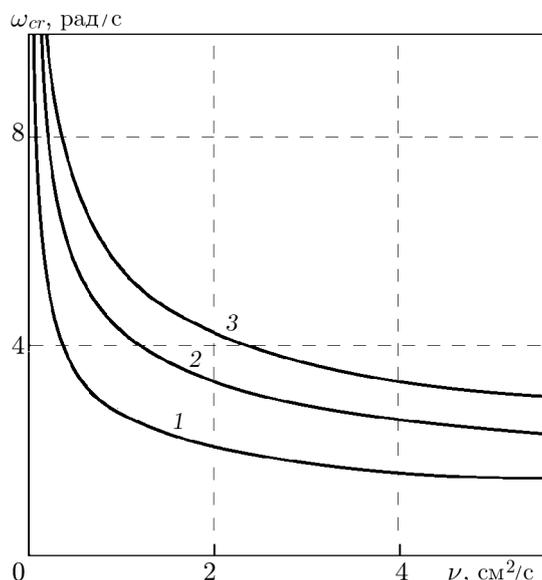


Рис. 5. Зависимость критической угловой скорости ω_{cr} нефтесборщика от вязкости ν при различных значениях v :
 1 — $v = 0,01$ м/с; 2 — $v = 0,02$ м/с; 3 — $v = 0,03$ м/с

критического угла, полученное из (18), имеет вид $\cos \varphi_{cr} = 2\omega^3 R^3 \nu / (9g v^2 h_0^2)$, поэтому $\Delta h_{cr} = R\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{cr}} - h_0 - H$. Угловая скорость, при которой достигается значение h_{cr} при углах $\varphi = \varphi_0$, называется критической: $\omega_{cr} = \sqrt[3]{9h_0^2 v^2 g \cos \varphi_0 / (2\nu)} / R$.

Следует учитывать, что при заданных параметрах установки для угловых скоростей $\omega > 10$ рад/с на поверхности барабана нефтесборщика возможны неустойчивые состояния (образование волновых поверхностей, разбрызгивание капель нефти). Поскольку режим работы нефтесборщика ограничен частотой вращения 1 об/с, неустойчивые состояния в задаче не рассматриваются.

На рис. 5 представлена зависимость критической угловой скорости барабана от кинематической вязкости собираемой нефти ν при различных скоростях движения нефтесборщика v . В расчетах использовались следующие значения параметров: $R = 0,2$ м, $g = 9,807$ м/с², $\varphi_0 = \pi/8$. Из рис. 5 следует, что с увеличением вязкости собираемой жидкости критическая угловая скорость вращения ротора нефтесборщика уменьшается, но при увеличении скорости набегающей жидкости увеличивается.

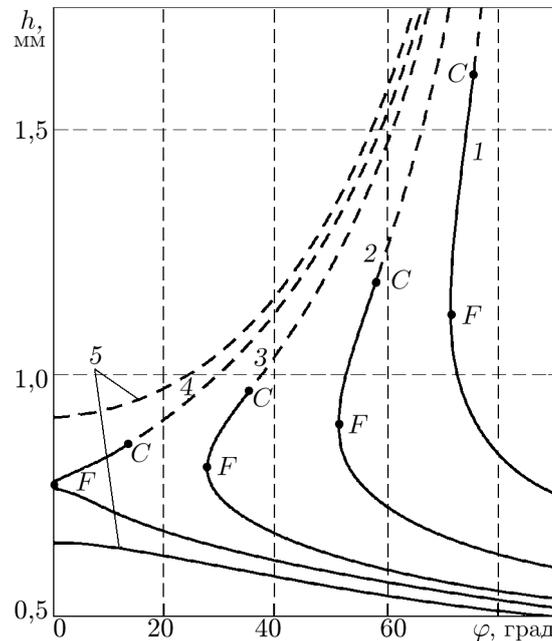


Рис. 6. Зависимость толщины нефтяной пленки на поверхности цилиндра нефтесборщика от угла φ при различных значениях ω :

1 — $\omega = 2$ рад/с, 2 — $\omega = 2,5$ рад/с, 3 — $\omega = 3$ рад/с, 4 — $\omega = 3,5$ рад/с, 5 — $\omega = 4$ рад/с; штриховые линии — область отрицательных скоростей; C — точки, соответствующие критическим углам и толщинам; F — точки, соответствующие углам и толщинам, при которых производительность нефтесборщика является оптимальной

На рис. 6 представлена зависимость толщины нефтяной пленки h на поверхности цилиндра нефтесборщика от угловой координаты φ при различных значениях ω . В расчетах использовались следующие значения параметров: $R = 0,2$ м, $h_0 = 0,01$ м, $v = 0,03$ м/с, $\nu = 10^{-5}$ м²/с. Штриховые линии, соответствующие отрицательным скоростям, лежат в области неустойчивых состояний, в которой с увеличением угловой координаты толщина слоя на поверхности барабана увеличивается. Устойчивые состояния соответствуют уменьшению толщины слоя с увеличением угла φ . В устойчивых состояниях при увеличении угловой скорости нефтесборщика выравнивается профиль формы поверхности нефти на его барабане и уменьшается толщина слоя. Критические точки C , соответствующие критическим углам и толщинам, расположены на участках кривых, находящихся в области неустойчивости (см. рис. 6). Точки F соответствуют оптимальной производительности нефтесборщика. Наличие на каждой кривой участка неустойчивости FC без отрицательных скоростей означает возможность возникновения автоколебаний высоты вала собираемой жидкости, приводящих к появлению так называемого ныркового эффекта.

В случае если нижняя часть ротора полностью погружена только в собираемую жидкость, производительность нефтесборщика определяется угловой скоростью вращения. Действительно, в этом случае критическая толщина определяется выражением $h_{cr} = \sqrt{2\omega R\nu/(g \cos \varphi_0)}$, а производительность согласно (15) вычисляется по формуле

$$Q_{cr} = h_{cr}(\omega R - g \cos \varphi_0 h_{cr}^2/(3\nu)) = (1/3)(\omega R)^{3/2} \sqrt{2\nu/(g \cos \varphi_0)} \quad (19)$$

и возрастает с увеличением угловой скорости, вязкости, радиуса барабана и его заглубления, определяемого углом φ_0 . Заметим, что эта формула справедлива только при относительно малых угловых скоростях, так как при больших скоростях производительность нефтесборщика ограничивается величиной притока вязкой жидкости.

При $\varphi = \varphi_0$ толщина слоя на поверхности барабана, соответствующая максимуму Q_f ($\partial Q/\partial h = 0$), равна $h_f = \sqrt{\omega R \nu / (g \cos \varphi_0)}$, поэтому производительность можно определить по формуле

$$Q_f = (2/3)(\omega R)^{3/2} \sqrt{\nu / (g \cos \varphi_0)}. \quad (20)$$

Значение Q_f в два раза больше значения Q_{cr} , вычисляемого по зависимости (19).

Нетрудно показать, что согласно (15) в точках $\varphi = \varphi_f$, соответствующих точке минимума зависимости $\varphi(h)$ (см. рис. 6), выполняется равенство $Q = Q_f$. Дифференцируя неявное соотношение $Q(h, \varphi) = \text{const}$, получаем соотношение

$$\frac{\partial \varphi}{\partial h} = - \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \right)_{\varphi} / \left(\frac{\partial Q}{\partial \varphi} \right)_h,$$

из которого следует, что при выполнении условия $(\partial Q/\partial h)_{\varphi} = 0$ производная от угла φ по толщине h равна нулю: $\partial \varphi/\partial h = 0$.

Положение точки захвата над уровнем собираемой жидкости в f -режиме работы нефтесборщика определяется соотношением

$$\Delta h_f = R \sin \varphi_f - h_0 - H = R \sqrt{1 - [4\omega^3 R^3 \nu / (9gh_0^2 v^2)]^2} - h_0 - H.$$

Нетрудно показать, что в f -режиме уровень вала над поверхностью собираемого нефтепродукта находится ниже, чем в критическом режиме. При прочих равных условиях это обеспечивает преимущество реализации в реальных установках f -режима.

Оптимальным режимом работы нефтесборщика является предельный f -режим, поскольку при этом толщина слоя достигает максимума и отсутствует вал, способствующий возникновению автоколебаний и “ныркового эффекта”. В этом случае производительность нефтесборщика определяется выражением (20), в чем нетрудно убедиться, выполнив соответствующие преобразования.

На рис. 7 представлены зависимости производительности нефтесборщика $Q_{cr} = Q_f/2$ от угла φ_0 , характеризующего заглубление центра ротора относительно невозмущенной поверхности собираемой жидкости. Существенное изменение производительности достигается при углах заглубления, превышающих 45° .

На рис. 8 представлены зависимости производительности нефтесборщика от угловой скорости вращения нефтесборщика ω при различных значениях R . В расчетах использовались следующие значения параметров: $g = 9,807 \text{ м/с}^2$, $\varphi_0 = \pi/8$, $\nu = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Из рис. 8 следует, что при увеличении угловой скорости нефтесборщика производительность возрастает по закону $y^{3/2}$.

Найденное из соотношений, аналогичных (18), выражение для косинуса оптимального угла

$$\cos \varphi_f = 4\omega^3 R^3 \nu / (9gh_0^2 v^2) \quad (21)$$

позволяет определить условие перелива. Поскольку согласно (21) $\cos \varphi_f$ является положительной величиной, $\varphi_{cr} < \pi/2$. Это означает, что самопроизвольный перелив через вращающийся ротор невозможен, если толщина слоя собираемого нефтепродукта h_0 меньше выступающей части ротора нефтесборщика. Явление перелива возможно только в следующих двух случаях: 1) скорость вращения равна нулю; 2) толщина слоя собираемого нефтепродукта превышает размеры выступающей части ротора нефтесборщика.

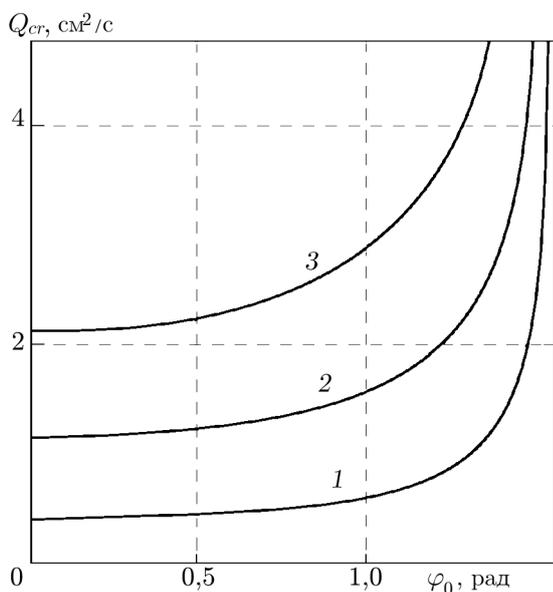


Рис. 7

Рис. 7. Зависимость производительности нефтесборщика от угла φ_0 при различных значениях ω :

1 — $\omega = 1$ рад/с; 2 — $\omega = 2$ рад/с; 3 — $\omega = 3$ рад/с

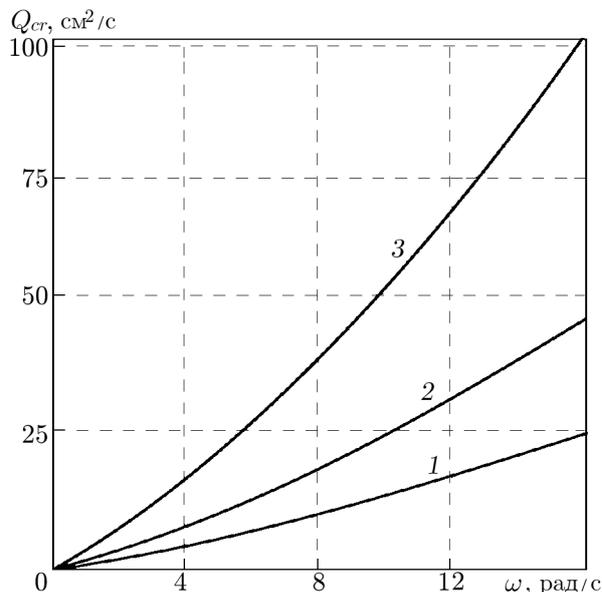


Рис. 8

Рис. 8. Зависимость производительности нефтесборщика от угловой скорости ω при различных значениях R :

1 — $R = 0,2$ м; 2 — $R = 0,3$ м; 3 — $R = 0,5$ м

Таким образом, предложенная в работе теория позволяет более точно описать гидродинамические процессы, происходящие при работе роторного адгезионного нефтесборщика, и найти соотношения, определяющие важнейшие технические параметры нефтесборщика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986.
2. Моделирование и оптимизация процессов и аппаратов локализации и сбора нефти: Отчет о НИР / Акад. наук Респ. Башкортостан; № 16/2. Стерлитамак, 2001.
3. Фаттахов Р. Г., Хасанов И. Ю., Рогозин В. И., Минлибаев М. Р. Моделирование процесса удаления жидких углеводородов с водной поверхности вращающимися телами // Экол. системы и приборы. 2005. № 7. С. 41–43.
4. Фаттахов Р. Г., Горюнова М. А. Моделирование и оптимизация процесса удаления жидких углеводородов с водной поверхности вращающимися телами // Тез. докл. Регион. школы-конф. молодых ученых, Стерлитамак, 24–28 сент. 2006 г. / Отв. ред. К. Б. Сабитов. Уфа: Гилем, 2006. С. 62–63.
5. Шагапов В. Ш., Хасанов И. Ю., Хусаинова Г. Я. Моделирование процесса удаления нефти с поверхности воды методом прилипания // Экол. системы и приборы. 2003. № 5. С. 33–35.

Поступила в редакцию 21/IV 2011 г.,
в окончательном варианте — 28/II 2013 г.