

УДК 532.542 : 537.84

КРАКОВ М. С., МАСКАЛИК Е. С., МЕДВЕДЕВ В. Ф.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

При перекачке высоковязких жидкостей основным ограничивающим фактором является высокое сопротивление трубопроводов, ведущее к повышению давления на входе в трубопровод. Такие способы снижения сопротивления, как использование полимерных добавок [1], вдув и отсос погранслоя [2], эффективны только для турбулентных течений и неприменимы при перекачке высоковязких жидкостей, движущихся, как правило, в ламинарном режиме. Для уменьшения касательных напряжений, т. е. снижения сопротивления, в последнем случае необходимо уменьшать вязкость жидкости в пристеночном слое. С этой целью используются подогрев перекачиваемой жидкости [3], а также гидротранспорт, применение которого требует перекачки вместе с транспортируемой высоковязкой жидкостью несмешивающейся с ней маловязкой жидкости [4]. Примером гидротранспорта является пара нефть — вода. Однако высокие энергетические затраты на подогрев и невозможность создания устойчивого равномерного покрытия стенок трубопровода слоем воды при использовании гидротранспорта ограничивают использование этих способов.

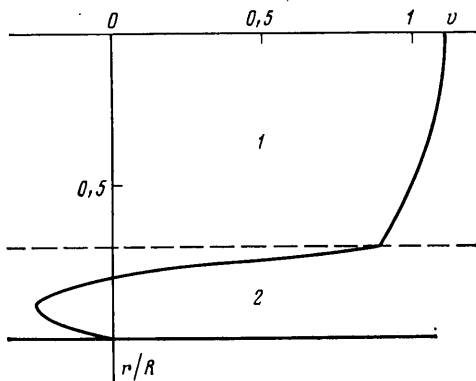
В настоящей работе обсуждаются возможности снижения сопротивления трубопроводов за счет покрытия их внутренней поверхности маловязкой магнитной жидкостью, удерживаемой на стенке неоднородным магнитным полем.

Жидкостей, обладающих заметными магнитными свойствами, в природе нет, однако они могут быть синтезированы искусственно [5]. Такие жидкости интенсивно взаимодействуют с постоянным магнитным полем и могут удерживаться им в заданном положении. Идея использования магнитожидкостных покрытий для снижения гидродинамического сопротивления была предложена в [6, 7]. Теоретический анализ показывает, что и сопротивление цилиндра, равномерно покрытого слоем магнитной жидкости, и сопротивление плоского канала с периодическим покрытием уменьшается, если вязкость магнитной жидкости достаточно мала.

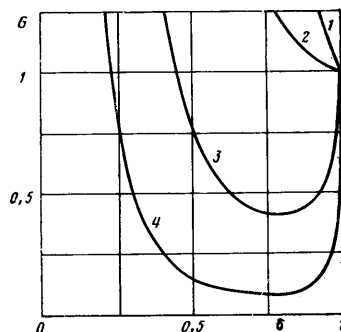
1. Анализ модельной задачи. Слой магнитной жидкости, удерживаемый магнитным полем, всегда имеет конечную вдоль потока длину. Так как внешняя часть слоя увлекается потоком, а слой в целом удерживается внешним магнитным полем, то пристеночная часть слоя должна двигаться в противоположном направлении. Таким образом, в слое магнитной жидкости, удерживаемом у стенки, под воздействием внешнего потока возникает безрасходное циркуляционное движение.

Как модель такого движения рассмотрим течение немагнитной жидкости с вязкостью η_1 в круглой цилиндрической трубе радиуса R , стенки которой покрыты бесконечным слоем магнитной жидкости толщиной $R-a$ с вязкостью η_2 . Предполагаем, что перепад динамического давления в потоке и слое магнитной жидкости компенсируется за счет магнитного поля. Тогда границу раздела жидкостей можно считать недеформируемой и заданной в виде кругового цилиндра радиуса a . Считаем также расход транспортируемой жидкости заданным и равным Q , а в слое магнитной жидкости расход равен нулю.

Так как в рассматриваемой модели движение жидкостей направлено вдоль оси трубы ($\mathbf{v} = \{0, 0, v_z(r)\}$ в цилиндрической системе координат, связанной с осью трубы) и все величины зависят только от радиальной координаты, то уравнение Навье — Стокса имеет простое решение, удовле-



Фиг. 1



Фиг. 2

творяющее условиям равенства скоростей и касательных напряжений на границе раздела жидкостей

$$\begin{aligned}
 v_1 &= \frac{Q}{\pi a^2} \left\{ 1 + K \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \right\} \\
 v_2 &= \frac{Q}{\pi a^2} K A \left\{ \left[\left(\frac{r}{a} \right)^2 - 1 \right] \frac{2\delta^2 \ln \delta + (1 - \delta^2)}{(1 - \delta^2)^2} - \ln \frac{r}{R} \right\} \\
 \frac{1}{\eta_1} \frac{dp_1}{dz} &= - \frac{8KQ}{\pi a^4}, \quad \delta = \frac{a}{R}, \quad \eta' = \frac{\eta_1}{\eta_2} \\
 K &= 1 - \frac{\eta'}{A} \left(1 + \frac{1 + \delta^2}{1 - \delta^2} \ln \delta \right), \quad A = \frac{4\eta' (1 - \delta^2)^2}{(1 - 3\delta^2)(1 - \delta^2) - 4\delta^4 \ln \delta}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

На фиг. 1 показан характерный профиль в трубопроводе при малых вязкостях магнитной жидкости ($\eta' = 20$, $\delta = 0,7$), области 1 и 2 соответствуют немагнитной и магнитной жидкостям. Градиенты скорости в транспортируемой жидкости намного меньше, чем в течении Пуазейля, но в слое магнитной жидкости они весьма велики. Однако так как вязкость магнитной жидкости мала, гидродинамическое сопротивление системы в целом, пропорциональное касательным напряжениям на стенке, должно уменьшаться.

Изменение сопротивления трубопровода при нанесении на стенки магнитожидкостного покрытия можно определить как отношение градиентов давления в потоке с покрытием и без него по фиксированном расходе потока. Используя выражение (1.1) и формулу Пуазейля, получим

$$G = \left(\frac{dp_1}{dz} \right) / \left(\frac{dp_1}{dz} \right)^0 = K / \delta^4 \tag{1.2}$$

На фиг. 2 показана зависимость величины изменения сопротивления трубопровода от толщины покрытия при различных вязкостях (кривые 1-5 соответствуют значениям $\eta' = 1; 4; 10; 20; 100$). Снижение сопротивления оказывается возможным только при $\eta' > 4$.

Таким образом, анализ модельной задачи показывает, что с помощью маловязкого магнитожидкостного покрытия можно значительно уменьшить гидродинамическое сопротивление, несмотря на то, что часть сечения трубопровода занята магнитной жидкостью.

2. Экспериментальное исследование. Влияние магнитожидкостного покрытия на гидродинамическое сопротивление изучалось на экспериментальной установке, рабочий участок которой представлял собой стеклянную трубу длиной 0,55 м с внутренним диаметром 22,5 мм и толщиной стенок 1 мм. Рабочий участок был соединен с системой напорных и сливных баков, обеспечивающих постоянную (с погрешностью 0,5 мм) заданную разность уровней, т. е. величину напора. Расход жидкости через рабочий участок измерялся объемным способом.

В качестве перекачиваемых жидкостей использовались водоглицериновые растворы с различными плотностями и вязкостями

M_s , кА/м	24	40	43	—	—	—	—	—
ρ , кг/м ³	1110	1330	1370	1230	1237	1246	1248	1252
ν , м ² /с	2,6	4,79	3,77	129	226	343	399	605

Для покрытия стенок использовались три образца магнитных жидкостей, представляющих собой коллоидные растворы частиц магнетита ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) в керосине, стабилизированные олеиновой кислотой.

Был определен коэффициент гидравлического сопротивления при течении водоглицериновых смесей через канал без покрытия. Теоретическое значение коэффициента при движении жидкостей в ламинарном режиме есть $\lambda = 64/\text{Re}$, где число Рейнольдса определено через диаметр трубы:

$\text{Re} = Ud/\nu = 4Q/\pi d\nu$ (U — средняя скорость, Q — расход жидкости, d — диаметр трубы). В проведенных экспериментах разность уровней в напорном и сливном баках изменялась от 10 до 90 мм, расход жидкости до 40 см³/с, температура жидкости колебалась от 16 до 18 С и контролировалась с точностью 0,1 С. Среднее значение λRe определялось с учетом сопротивлений входа и выхода трубы.

Для удержания на внутренней поверхности трубы магнитной жидкости использовалась магнитная система из постоянных магнитов, имевших форму параллелепипеда с размерами $5 \times 10 \times 25$ мм, намагниченных вдоль меньшего из ребер.

Наиболее оптимальным с точки зрения удержания магнитной жидкости оказалось расположение магнитов, показанное на фиг. 3 [8], где 1 — постоянные магниты, 2 — труба, 3 — магнитная жидкость, а стрелками показано направление намагниченности магнитов.

Из-за противоположной направленности намагниченности соседних магнитов силовые линии магнитного поля замыкались между соседними магнитами и были направлены почти касательно к поверхности трубы. Благодаря этому исключалась неустойчивость поверхности магнитной жидкости и образование на ней пиков, так что поверхность магнитной жидкости имела форму, показанную на фиг. 3. Вектор намагниченности магнитов также периодически изменялся вдоль оси трубы, так что ее внутренняя поверхность оказалась покрытой системой слоев магнитной жидкости, периодической как в азимутальном, так и в осевом направлении, с размерами основания слоев 8×24 мм. Расстояние между отдельными слоями в обоих направлениях составляло ~ 1 мм. Толщина слоев изменялась путем дозированного введения магнитной жидкости.

Определялись расходно-напорные характеристики трубопровода при различных толщинах слоев магнитной жидкости. Средняя толщина слоя δ определялась как отношение объема введенной в трубу магнитной жидкости к объему трубы. Было проведено 42 варианта эксперимента: магнитная жидкость № 1 со всеми водоглицериновыми растворами и раствор № 4 со всеми магнитными жидкостями для шести толщин слоя.

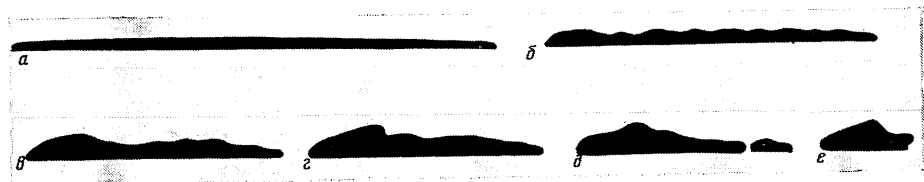
Типичная характеристика показана на фиг. 3, где h — разность уровней в баках, Q — расход водоглицериновой смеси. Кривые 1–7, представляющие осредненные экспериментальные данные, соответствуют различным толщинам слоя: $\delta = 0; 0,029; 0,043; 0,058; 0,073; 0,089; 0,104$. Приведенные данные соответствуют раствору № 5 и магнитной жидкости № 1. Из фиг. 3 видно, что магнитожидкостное покрытие может привести к трехкратному увеличению расхода жидкости.

Отметим нетривиальный характер зависимости $Q(h)$ — кривые являются вогнутыми, т. е. с ростом скорости потока степень снижения сопротивления несколько возрастает (отклонение от прямой превышает точность эксперимента). Этот факт является неожиданным, так как с ростом скорости потока растет циркуляция в слоях магнитной жидкости, усложняется характер течения и эффект снижения сопротивления должен уменьшаться. Это предположение соответствует и результатам численного анализа течения в плоском канале с синусоидальным магнитожидкостным покрытием [9].

Однако во всех экспериментах расходно-напорные характеристики имели вогнутый характер. Возможно, это связано со сложным характером

зависимости вязкости магнитной жидкости от скорости сдвига. При малых скоростях сдвига магнитные жидкости обладают ярко выраженными реологическими свойствами — их вязкость падает с ростом скорости сдвига. В пользу этого предположения свидетельствует и тот факт, что у жидкостей с высокой намагниченностью ($M_s=40$ кА/м и особенно у жидкости с намагниченностью $M_s=43$ кА/м) этот эффект проявляется сильнее.

По расходно-напорным характеристикам с учетом местных сопротивлений выходного и входного участков трубы был определен коэффициент гидравлического трения λ . Величина $\lambda \text{ Re}$ уменьшается с увеличением толщины покрытия. Анализ полного объема экспериментальных данных



Фиг. 4

показывает, что степень снижения сопротивления зависит как от толщины покрытия, так и от отношения вязкостей жидкостей $v' = v_1/v_2$, что качественно соответствует выражению (1.2).

Количественно совокупность экспериментальных данных с погрешностью 15% может быть аппроксимирована зависимостью

$$\lambda = \frac{70}{B \text{ Re}}, \quad B = 1 + \frac{17,5v' - 500}{v'} \left(\delta \frac{v_0}{v_2} \right)^{1,16} \quad (2.1)$$

При этом экспериментальные значения величины заключены в следующих диапазонах: $\delta=0-0,104$; $v'=60-280$; $\text{Re}=0,1-14$, v_2 — вязкость образцов магнитной жидкости, $v_0=2,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Коэффициент λ зависит не только от отношения вязкостей магнитной и немагнитной жидкостей v' , но и непосредственно от вязкости магнитной жидкости v_2 . Возможно, этот факт имеет ту же природу, что и вогнутый характер расходно-напорных характеристик — сложный характер зависимости вязкости магнитной жидкости от величины магнитного поля и скорости сдвига, который не учитывается в теоретической модели.

Таким образом, в результате экспериментального исследования показано, что маловязкое магнитожидкостное покрытие внутренней поверхности трубопроводов приводит к значительному снижению гидравлического сопротивления последних. Так, при отношении вязкостей $v'=280$ и толщине слоя магнитной жидкости № 1 $\delta=0,104$ при заданном напоре расход водоглицеринового раствора увеличивался более чем в 2,5 раза.

3. Устойчивость слоев магнитной жидкости. Основным вопросом, определяющим значимость полученных результатов для практики, является надежность удержания слоя магнитной жидкости у стенки. Действительно, внешний поток, падающий на слой магнитной жидкости, вызывает искривление его поверхности — слой утолщается вдоль потока. Искривление поверхности слоя тем меньше, чем больше величина $\mu_0 M_s H^*$, т. е. чем выше магнитоэстатическое давление в жидкости (M_s — намагниченность насыщения магнитной жидкости, H^* — напряженность магнитного поля). Если искривление слишком велико, то толщина слоя по потоку возрастает настолько, что поле на его поверхности становится недостаточным для удержания магнитной жидкости и слой не может более устойчиво удерживаться магнитным полем на обтекаемой поверхности.

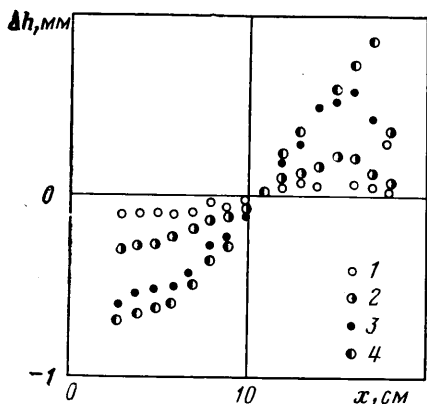
С целью определения характера неустойчивости поверхности магнитной жидкости, приводящей к срыву слоя со стенки, был проведен сле-

циальный эксперимент, в котором изучалась поверхность слоя магнитной жидкости на основе керосина, обтекаемого потоком воды.

Экспериментальный участок представлял собой стеклянную трубу с внутренним диаметром 40 и длиной 800 мм, соединенную последовательно с измерительными ротаметрами с водопроводной сетью. Под трубой был расположен постоянный магнит, имевший форму параллелепипеда $8 \times 17 \times 185$ мм, намагниченного вдоль ребра длиной 17 мм. Магнит был расположен вдоль трубы так, что площадка 17×185 мм было горизонтальной. В вертикальной плоскости симметрии поле магнита с погрешностью 8% описывалось выражением $B = B_0 \exp(-0,123 y)$, где $B_0 = 60$ мТл, y отсчитывался от поверхности магнита в миллиметрах. В трубу вводилась магнетитовая магнитная жидкость на основе керосина, изготовленная харьковским заводом «Химреактивы» в 1982 г. (ТУ 6-09-06-946-79, плотность $\rho = 916$ кг/м³, вязкость $\nu = 2,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с, намагниченность $M_s = 6$ кА/м).

При введении 5 мл магнитной жидкости длина слоя была 16 см, максимальная толщина 4 мм, при введении 10 мл длина была той же, толщина достигала 5,5 мм, оставаясь почти постоянной вдоль всего слоя и уменьшаясь на длине 2–3 см от края (фиг. 4, а). В поперечном сечении слой представлял собой сегмент сечения трубы, так как его поверхность была почти горизонтальной. Контроль за положением поверхности магнитной жидкости осуществлялся с помощью катетометра КМ-6 с погрешностью 0,01 мм в 16 точках по длине слоя, расположенных через 1 см. Для исключения влияния преломления света на точность отсчета экспериментальный участок был окружен прозрачным кожухом с вертикальными стенками, заполненным водой.

Эксперимент проводился в двух вариантах. В первом расстояние от нижней образующей трубы до магнита составляло 4 мм, во втором — 12 мм. Качественное изменение состояния поверхности было следующим. При небольших расходах воды поверхность слоя (объем магнитной жидкости 10 мл) оставалась стационарной, лишь изменяясь по толщине. На



Фиг. 5

фиг. 5 показано отклонение поверхности слоя от первоначального при расстоянии до магнита 12 мм (фиг. 4, а также соответствует этому случаю). Отсчет координаты x ведется от края магнита. Точки, помеченные цифрами 1–4, соответствуют расходам воды 23; 41; 60 и 70 см³/с. Видно, что слой утолщается по потоку, что соответствует результатам [10]. Обращает на себя внимание то, что точка постоянного уровня остается почти на месте.

Начиная с некоторого критического расхода, стационарная поверхность слоя становится неустойчивой. Харак-

тер развития этой неустойчивости показан на фиг. 4. При расходе $Q = 71$ см³/с на поверхности слоя, ранее оставшейся стационарной, появлялись волны, распространяющиеся в направлении потока (фиг. 4, б). Амплитуда волн не менялась вдоль слоя, а с увеличением расхода начала увеличиваться по мере распространения волны. Одновременно слой сносился вниз по потоку. Этот режим аналогичен волновому режиму пленочных течений [11]. Начиная с $Q = 80$ см³/с отмечалось увеличение амплитуды волн при их распространении вдоль слоя и одновременное увеличение частоты. Дальнейшее увеличение расхода воды приводило к образованию утолщения на передней кромке слоя, периодически возникавшего и являвшегося источником распространяющихся вдоль слоя волн (фиг. 4, в, г). При $Q = 160$ см³/с амплитуда распространяющихся волн становилась настолько большой, что достигала дна. При этом часть слоя, лежащая ниже по потоку, отрывалась от него и уносилась потоком (фиг. 4, д, е). В результате через непродолжительное время вся магнитная жидкость отрывалась от внутренней поверхности трубопровода.

Неустойчивость поверхности магнитной жидкости была обнаружена и в экспериментах, описанных в разд. 2. Ее наступление определялось визуально по появлению в потоке на выходе из рабочего участка мелких капелек магнитной жидкости. Критическое значение числа Рейнольдса, определяющее срыв магнитожидкостного покрытия, оказалось связанным с другими параметрами задачи. При использовании кроме названных в разд. 2 безразмерных комплексов параметра $P = \rho gh / \mu_0 M_s H^*$, имеющего смысл безразмерного напора (ρ — плотность водоглицеринового раствора, h — разность уровней), можно получить соотношение, связывающее критические значения параметров. Для тех же 42 вариантов эксперимента, описанного в разд. 2, критическое значение числа Рейнольдса, определяющее наступление неустойчивости, зависит от остальных параметров следующим образом (с погрешностью 15%):

$$\text{Re}^* = 2,15 \cdot 10^8 \delta^{1,5} P^{2,5} / (v')^2 \quad (3.1)$$

Зависимость получена в следующем диапазоне параметров: $\text{Re} = 0,1 - 14$; $\delta = 0,029 - 0,104$; $P = 0,06 - 0,5$; $v' = 60 - 280$.

Выражение (3.1) связывает критическое число Рейнольдса с параметром P , представляющим собой безразмерный напор, который сам определяется числом Рейнольдса. Эту зависимость можно учесть, если принять во внимание, что потери напора в трубопроводе связаны со скоростью соотношением $\Delta p = \lambda (L/d) \rho v^2 / 2$. Так как $\Delta p = \rho gh$, а λ описывается выражением (2.1), то параметр P можно переписать следующим образом: $P = \text{Re} P_0 / B$, где $P_0 = 32 \rho v^2 L_0 / \mu_0 M_s H^* d_0^3$, $L_0 = 0,55$ м — длина экспериментального участка трубопровода, $d_0 = 22,5$ мм — его диаметр. Тогда выражение (3.1) можно окончательно записать в виде

$$\text{Re}^* = 8,1 \cdot 10^{-9} \frac{(v')^{4/3}}{\delta} \left(\frac{B}{P_0} \right)^{5/3} \quad (3.2)$$

Соотношение (3.2) также описывает данные эксперимента с погрешностью 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И., Васецкая Н. Г., Иоселевич В. А., Пилипенко В. Н. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров // Механика турбулентных потоков. М.: Наука, 1980.
2. Чжен П. Управление отрывом потока: экономичность, эффективность, безопасность: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 552 с.
3. Агапкин В. М., Челенцов С. Н. Перекачка высоковязких и застывающих нефтей и нефтепродуктов за рубежом. М.: ВНИИОЭНГ, 1974. 88 с.
4. Асагурян А. Ш., Черникин В. И. Гидротранспорт вязких нефтей по трубопроводам // Нефть хоз-во. 1965. № 7. С. 56–59.
5. Гогосов В. В., Налегова В. А., Шапошникова Г. А. Гидродинамика намагничивающихся жидкостей // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. Т. 16. М.: ВИНТИ, 1981. С. 76–208.
6. Medvedev V. F., Krakov M. S. Flow separation control by means of magnetic fluid // J. Magn. and Magn. Mater. 1983. V. 39. № 1–2. P. 119–122.
7. Краков М. С. Управление отрывом потока с помощью намагничивающейся жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 3. С. 10–14.
8. Медведев В. Ф., Краков М. С., Маскалик Е. С., Шибуняев В. И. Устройство для снижения гидравлического сопротивления в трубопроводе: А. с. № 1370360 СССР // Б. И. 1988. № 4. С. 27.
9. Medvedev V. F., Krakov M. S., Maskalik E. S., Nikiforov I. V. Reducing resistance by means of magnetic fluid // J. Magn. and Magn. Materials. 1987. V. 65. P. 339–342.
10. Вислович А. Н., Краков М. С., Медведев В. Ф. О форме границы раздела движущихся магнитной и немагнитной жидкостей // Матер. III Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям, г. Плес, 1983. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 54–55.
11. Шкадов В. Я. Волновые режимы течения тонкого слоя вязкой жидкости под действием силы тяжести // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 1. С. 43–51.