

УДК 519.673

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА

Ю. Г. КУЗЬМИНСКИЙ<sup>а†</sup>, С. В. ШИЛЬКО<sup>а</sup>, В. И. ВЬЮН<sup>б</sup>

Обсуждается применимость критерия Рейнольдса при описании течения вязких жидкостей на примере нефти. Разработана математическая модель переходных форм течения в технологическом процессе транспорта нефти по магистральным трубопроводам. Предлагаемая модель функционирования присадок, основанная на линейном законе преобразования коэффициентов обобщенной формулы Лейбензона в зависимости от вводимого параметра, не зависящего от числа Рейнольдса — степени ламинаризации потока в трубах с гладкими стенками, позволяет прогнозировать гидравлическое сопротивление, обусловленное вязким трением.

**Ключевые слова:** течение жидкости, трубопровод, критерий Рейнольдса, потери напора на трение, противотурбулентные присадки, математическая модель, степень ламинаризации.

**Введение.** Противотурбулентные присадки [1, 2] применяются для снижения гидравлических потерь напора турбулентного течения в трубах с гладкими стенками, что ведет к увеличению производительности трубопровода.

Гидравлические потери напора на участке нефтепровода состоят из двух компонент: 1 — потери напора на трение, выражающие потери механической энергии за счет сил внутреннего трения слоев вязкой нефти и 2 — потери напора на преодоление местных сопротивлений поворотов, сужений, задвижек и т. д. Потери напора на трение определяют по формуле Дарси–Вайсбаха [4]:

$$\Delta h_{\tau} = \lambda \frac{u^2}{2gd} l,$$

а потери напора на преодоление местных сопротивлений по формуле:

$$\Delta h_m = \xi \frac{u^2}{2g},$$

где  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления,  $\xi$  — суммарный коэффициент всех местных сопротивлений на участке трубопровода;  $g$  — ускорение свободного падения.

Гидравлические потери в трубопроводе могут определяться по обобщенной формуле Лейбензона [5]:

$$\Delta h = \beta \frac{q^{2-\alpha} \mu^{\alpha}}{d^{5-\alpha}} l, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  — потери напора;  $q$  — мгновенный расход нефти;  $d, l$  — диаметр и длина отрезка трубопровода;  $\mu$  — кинематическая вязкость; коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяются характером течения и приведены в табл. 1.

<sup>а</sup> Институт механики металлополимерных систем НАНБ им. В. А. Белого. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

<sup>б</sup> Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого.

<sup>†</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

Таблица 1. Параметры течения

Характер течения	Критерий	$\alpha$	$\beta$
Ламинарный	$Re < 2300$	1	4,15
Переходный	$Re_1 < Re < Re_2$	—	—
Турбулентный по трубам с гладкими стенками	$Re_2 < Re < Re_3$	0,250	0,0247
Смешанный	$Re_3 < Re < Re_4$	0,123	0,0170
Турбулентный по трубам с шероховатыми стенками	$Re_4 < Re$	0	0,0130

Областью турбулентного течения в трубах с гладкими стенками называют течение нефти в развитом турбулентном режиме, в котором коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от шероховатости (формула Блазиуса:  $\lambda = 0,3164Re^{0,25}$ ). В смешанной области гидравлическое сопротивление зависит от шероховатости и скорости течения (формула Альтшуля:  $\lambda = 0,11(R_a/d + 64/Re)^{0,25}$ ). В области турбулентного течения в трубах с шероховатыми стенками коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от скорости течения (формула Шифрисона  $\lambda = 0,11(R_a/d)^{0,25}$ ). Границы ламинарного и турбулентного характера течения в разных источниках [4, 6] имеют разные критические числа Рейнольдса, поэтому выделяется переходная зона, характеризующаяся временными очагами турбулентности.

Число Рейнольдса  $Re$  определяется формулой:

$$Re = \frac{4q}{\pi d \mu} \tag{2}$$

В работе [5] критические числа Рейнольдса определяются следующим образом:

$$Re_1 = 2300, \quad Re_2 = 3300, \quad Re_3 = \frac{59,5}{(2\varepsilon)^{7/8}} = 455000d^{8/7}, \quad Re_4 = \frac{665 - 765 \log(\varepsilon)}{\varepsilon} = 17473000,$$

где относительная шероховатость внутренней стенки трубы  $\varepsilon = R_a/d$ ,  $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля (0,2 мм).

В табл. 2 приведены значения параметров режимов перекачки по трубопроводу длиной 100 км при вязкости нефти 23 сСт для разных диаметров трубы.

Распределение скоростей по сечению трубы определяется формулами, приведенными в работе [6] для ламинарного режима:

$$u_1 = 8 \frac{q}{\pi r^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{r} \right)^2 \right]$$

и турбулентного с гладкими трубами:

$$u_2 = 2,896 \frac{q}{\pi r^2} \left( \frac{y}{r} \right)^{1/7},$$

где  $u$  — скорость течения,  $r$  — радиус,  $y$  — расстояние от стенки трубы.

На рис. 1 приведено полученное с использованием вышеприведенных зависимостей распределение безразмерной скорости в поперечном сечении трубы относительно среднего значения ско-

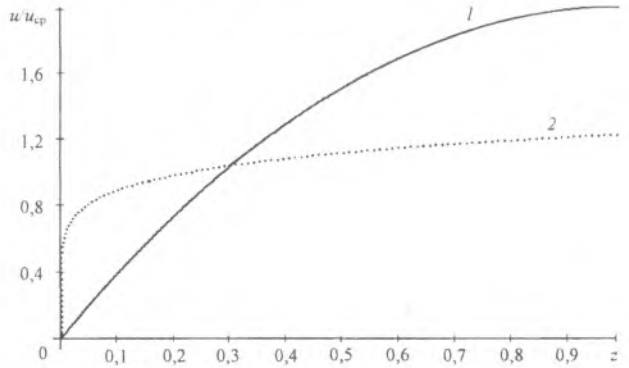


Рис. 1. Распределение относительных скоростей течения  $u/u_{cp}$  в поперечном сечении трубы: 1 — ламинарный режим; 2 — турбулентный

Таблица 2. Параметры режимов течения

Диаметр, мм	$Q_{max}$ , м³/ч	$\Delta p_{max}$ , кПа
630	15/3000	2/11,1
720	23/5300	2/15,6
820	34/9200	2/21,8
1020	66/23210	2/38,1

Примечание. Слева от черты ламинарный режим течения, справа — турбулентный с гладкими стенками труб.

рости в зависимости от безразмерной координаты  $z = y/r$ . Пунктиром показано распределение скоростей турбулентного течения по трубе с гладкими стенками. Видно, что скорость турбулентного течения у гладких стенок труб значительно превышает скорость ламинарного течения. Это объясняет значительно больший износ труб при турбулентном течении. Данный факт находит подтверждение при очистке трубопроводов от отложений на внутренних стенках труб.

На участках трубопроводов, где в целях увеличения производительности невозможно повышение давления или строительство новых трубопроводов, эффективно применение присадок [3].

**Модель действия присадок.** Присадка ВИОЛ, согласно данным работы [1], использовалась в виде 10%-ного раствора сополимера альфа-альфеинов в гептане с концентрацией 0,0045%. Впрыск присадки осуществлялся на расстоянии 69 км до окончания участка западно-сибирского нефтепровода протяженностью 424 км и условным диаметром 1220 мм.

До применения присадки производительность трубопровода при вязкости 564 сСт составляла 6063 м<sup>3</sup>/ч. После применения присадки производительность выросла до 6180 м<sup>3</sup>/ч (на ≈ 2%) при уменьшении вязкости до 474 сСт. Изменение гидравлического уклона, определяемого как отношение потерь напора к длине трубопровода, составило в зоне применения присадки с учетом изменения вязкости 17,5%.

Согласно данным работы [2], применение на российско-латвийском нефтепродуктопроводе присадки Necadd-447 в виде 25%-ного дисперсного раствора в натуральном носителе высокомолекулярного полимера обеспечило увеличение производительности на 14%. Применения аналогичной присадки Necadd-547 в гелеобразной форме оказалось менее эффективным.

Уравнение баланса энергии на основе обобщенной формулы Лейбензона (1) и параболической аппроксимации напорных характеристик однотипных насосных агрегатов для модельного участка нефтепровода диаметром 1020 мм и протяженностью 100 км при вязкости нефти 23 сСт имеет вид:

$$k(a + bq + cq^2) = \beta \frac{q^{2-\alpha} \mu^\alpha}{d^{5-\alpha}} l,$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты напорной характеристики насосов,  $k$  — количество работающих насосов.

Исходя из этого уравнения, увеличение производительности путем использования присадок при постоянстве остальных параметров возможно только за счет варьирования коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , что отражает изменение формы течения нефти в трубопроводе. На рис. 2 приведены зависимости выходного давления и числа Рейнольдса от относительного роста производительности  $q/q_0$  для базовой производительности 7800 м<sup>3</sup>/ч. Видно, что при неизменности формы течения увеличение производительности ведет к росту давлений в начале участка и росту числа Рейнольдса.

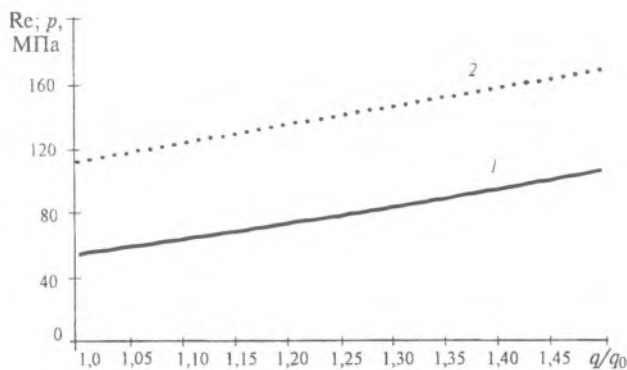


Рис. 2. Изменение выходного давления  $p$  (1) и  $Re$  (2) при росте производительности  $q/q_0$

Изменение характера течения от турбулентного в трубах с гладкими стенками к ламинарному можно описать следующим образом:

$$\alpha(x) = 0,25 + x(1 - 0,25); \tag{3}$$

$$\beta(x) = \frac{0,2572[Re_2 - x(Re_2 - Re_1)]^{\alpha(x)-0,25}}{4^{\alpha(x)} \pi^{2-\alpha(x)}},$$

где  $x$  — безразмерный параметр степени ламинаризации потока, изменяющийся в интервале от 0 до 1. Под степенью ламинаризации потока понимается величина перехода турбулентного потока ( $x = 0$ ) к ламинарному ( $x = 1$ ).

Указанное изменение выполняется не только в переходной, но и во всей области турбулентного течения в трубах с гладкими стенками. В табл. 3 приведены оценки изменения параметров  $x$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  при увеличении производительности участка и постоянстве выходных давлений насосной станции.

Таблица 3. Параметры течения

Рост производительности	$x$	$\alpha$	$\beta$
1,3	0,153/0,188	0,365/0,391	0,0597/0,0732
1,5	0,226/0,275	0,419/0,456	0,0906/0,1190
2,0	0,355/0,421	0,516/0,566	0,1852/0,2658

Примечание. Слева от черты для базовой производительности ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) — 7800, справа — 3600.

Рост производительности на участке нефтепровода ведет к падению напора, создаваемого включенными насосами, что обусловлено убывающей напорной характеристикой насосов (рис. 3). Таким образом, рост производительности на модельном участке за счет ламинаризации потока связан с уменьшением потребляемой энергии.

На рис. 4 показано относительное изменение гидравлического уклона ( $y = i_{\text{нов}}/i_{\text{стар}}$ ) на модельном участке при различной степени ламинаризации потока  $x$  для трех насосов и росте производительности в 1,3 раза. В табл. 4 приведены расчетные значения степени ламинаризации для различной производительности.

**Критерий Рейнольдса в условиях неоднородного потока.** Достаточно точным критерием, определяющим в обобщенной формуле Лейбензона форму течения нефти в трубопроводах без применения присадок, является число Рейнольдса и его критические значения.

Изложенная методика определения коэффициентов формулы Лейбензона (1) на основе предложенного описания (3) перехода турбулентного потока в трубах с гладкими стенками в ламинарный поток в результате действия присадки не зависит от того, в какой части области течения с гладкими стенками позиционировалась форма течения — ближе к ламинарному течению, или к его смешанной области. Основным параметром здесь является степень ламинаризации  $x$ . Однако в этом случае по данным текущего контроля основных параметров течения (диаметр, расстояние, давление, мгновенный расход, вязкость, плотность) в рамках существующего определения числа Рейнольдса (2) и его критических значений невозможно определить режим течения нефти. Увеличение производительности при использовании присадок ведет к росту числа Рейнольдса при неизменном диаметре и некотором снижении вязкости. Как следует из рис. 2, повышение производительности в отсутствие присадок помимо увеличения числа Рейнольдса сопровождается ростом гидравлических потерь. Из рис. 4 следует, что повышение производительности, вызванное переходом к ламинарному течению при применении присадок, сопровождается существенным снижением гидравлических потерь.

Известные зависимости гидравлических потерь (1) и числа Рейнольдса (2) от роста производительности имеют положительную первую производную. При использовании присадок зависи-

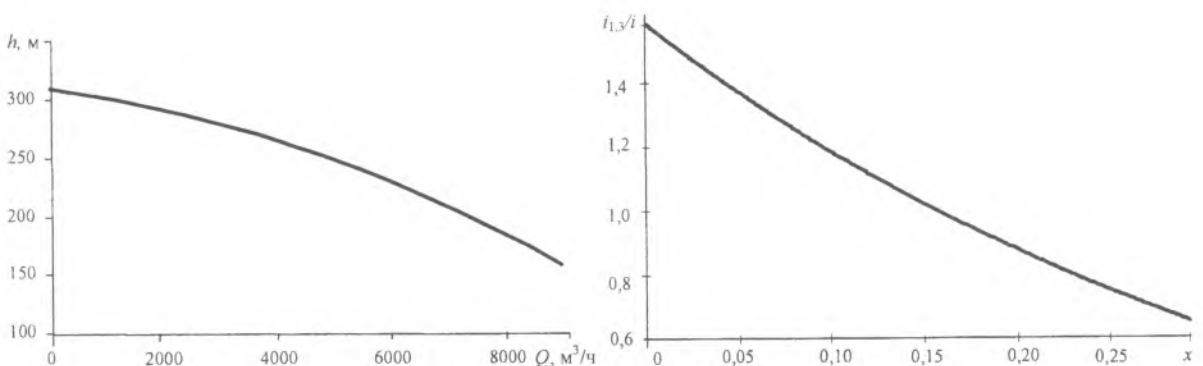


Рис. 3. Напорная характеристика магистрального насосного агрегата НМ-7000

Рис. 4. Относительное изменение гидравлического уклона  $i_{1,3}/i$  при различной степени ламинаризации потока  $x$  и росте производительности в 1,3 раза

мость числа Рейнольдса от роста производительности имеет положительную производную, а зависимость гидравлических потерь от роста производительности имеет отрицательную первую производную. Отсюда следует, что число Рейнольдса не может определять изменения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  формулы расчета гидравлических потерь.

**Свойства присадок и ламинаризация потока.** Важными параметрами присадки являются ее молекулярная масса, время линейной ориентации вдоль потока (вытяжки) его макромолекул, концентрация полимера в исходном носителе и растворе присадки в нефти. Молекулярная масса и концентрация присадок влияют на степень ламинаризации  $x$  в формуле (3). Характер влияния параметров присадки на указанный параметр может быть установлен экспериментально на действующем участке нефтепровода. Физические эксперименты на лабораторном оборудовании, предпочтительные с точки зрения простоты реализации, требуют применения теории подобия для минимизации погрешностей. Как видно из табл. 4, степень ламинаризации для достижения заданного роста производительности зависит от исходной производительности или исходного числа Рейнольдса. Достижение требуемого роста производительности при фиксированном числе Рейнольдса и концентрации присадок при ином числе Рейнольдса может не дать требуемого эффекта.

Таблица 4. Зависимость роста производительности трубопровода от степени ламинаризации потока  $x$

Рост производительности	$x$
1,3	0,256/0,301
1,5	0,413/0,538
1,6	0,497/0,714

Примечание. Слева от черты для двух насосов, справа — для трех.

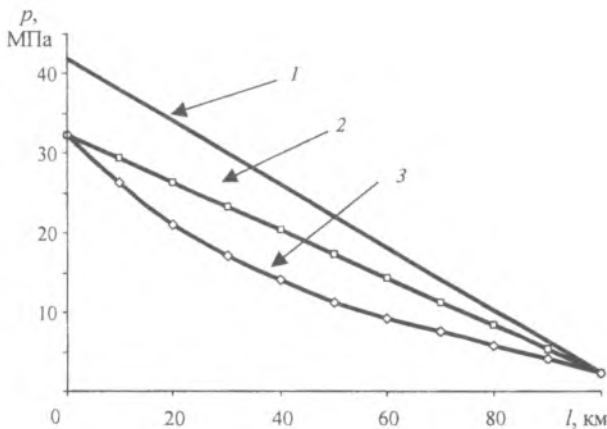


Рис. 5. Распределение давлений  $p$  вдоль трубопровода в зависимости от расстояния от точки введения присадки: 1 — отсутствие присадок; 2 — без учета времени ориентации; 3 — с учетом времени ориентации

Существенным остается известный факт прекращения эффекта применения присадок после их прохождения с нефтью через магистральные насосные агрегаты, при работе которых разрушаются макромолекулы полимера.

**Закключение.** Использование высокомолекулярных присадок приводит к существенной неоднородности течения нефти и при применении известного подхода, основанного на выделении однородных режимов течения (ламинарного либо турбулентного) нефти, выявляет невозможность определения формы потока по числу Рейнольдса и его критическим значениям. Предлагаемая математическая модель функционирования присадок, основанная на линейном законе преобразования коэффициентов обобщенной формулы Лейбензона в зависимости от вводимого параметра — степени ламинаризации турбулентного потока в трубах с гладкими стенками, не зависящего от

Так как эффективное функционирование присадки начинается после определенного периода времени, равного длительности ориентации макромолекул полимера, степень ламинаризации потока становится зависимой от расстояния контрольной точки от места введения присадки. На рис. 5 приведено распределение давления по длине модельного участка нефтепровода для трех видов потоков: 1 — в отсутствие присадки; 2 — при наличии присадки без учета времени начала ее функционирования и 3 — с учетом этого времени.

Видно, что зависимость степени ламинаризации от расстояния до точки введения присадки  $x(l)$  не является постоянной величиной и зависит от реологических свойств присадки.

Моделирование применения присадок с использованием безразмерного параметра степени ламинаризации потока возможно и для случая перехода от смешанной области турбулентного течения в трубах с гладкими стенками, хотя в реальных технологических процессах смешанные области течения встречаются редко.

числа Рейнольдса потока, позволяет прогнозировать гидравлическое сопротивление, обусловленное вязким трением турбулентного течения в трубопроводе.

### Обозначения

$\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $\xi$  — суммарный коэффициент всех местных сопротивлений;  $\Delta h$  — потери напора;  $q$  — мгновенный расход нефти;  $d, l$  — диаметр и длина отрезка трубопровода;  $\mu$  — кинематическая вязкость;  $\alpha$  и  $\beta$  — безразмерные коэффициенты, определяемые режимом течения;  $\varepsilon$  — относительная шероховатость стенки трубы;  $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля;  $Q_{\max}$  — максимальная производительность;  $\Delta p_{\max}$  — максимальный перепад давлений;  $u$  — скорость течения;  $r$  — радиус трубы;  $y$  — расстояние от стенки трубы;  $a, b, c$  — коэффициенты напорной характеристики насосов;  $k$  — количество работающих насосов;  $x$  — безразмерный параметр степени ламинаризации потока;  $i$  — гидравлический уклон;  $p$  — выходное давление;  $h$  — высота столба жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

### Литература

1. Гареев М. М., Несын Г. В., Манжай В. Н. Результаты ввода в поток нефти присадки для снижения гидравлического сопротивления // Трубопроводный транспорт нефти. — 1992, № 12, 30–31
2. Ерошкина И. И., Прохоров А. А. Расчет эффекта снижения гидравлического сопротивления трубопроводов при применении противотурбулентных присадок // Тез. докл. 4 междунауч. техн. конф. Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта. — Новополюк: Полоцкий гос. ун-т. — 2003, 31–33
3. Бордовский А. М., Вьюн В. И., Кузьминский Ю. Г., Минеев Б. П. Влияние параметров технологического оборудования участка нефтепровода на производительность и эффективность использования электроэнергии // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2003, № 1, 73–82
4. Васильев Г. Г., Коробков Г. Е. Трубопроводный транспорт нефти. — М.: Недра—Бизнесцентр. — 2002
5. Транспорт и хранение нефти / Под ред. Н. Н. Константинова. — М.: Недра. — 1975
6. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. — М.: Машиностроение. — 1976

Поступила в редакцию 21.04.04.

Kuzminsky Yu.G., Shilko S.V., and Viun V.I. **Mathematical modeling of the effect of counter-turbulence additives on the performance of an oil pipeline portion.**

The applicability of the criterion of Reynolds to describing the flow of viscous fluids is discussed using the case of oil. A mathematical model of transient types of flow in the process of oil transportation along main pipelines has been developed. The proposed model of performance of the additives is based on the linear law of transformation of the coefficients of the generalized formula of Leybenzon as a function of an assigned parameter that does not depend on Reynolds's number or the degree of flow laminarization in smooth-walled pipes and it enables to predict the hydraulic resistance due to viscous friction.