

UDC 622.692.12; UDC 665.613.22: 532.135

**THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE FLUID  
WITH FILLERS**

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ  
С НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

**R.N. Bakhtizin, G.M. Panakhov, V.G. Guseynov**

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,**

**Ufa, the Russian Federation**

**Institute of Mathematics and Mechanics of ANAS, Baku, Azerbaijan**

**Бахтизин Р.Н., Панахов Г.М., Гусейнов В.Г.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», г. Уфа, Российская Федерация**

**Институт Математики и Механики НАН Азербайджана, г. Баку,  
Азербайджан**

**e-mail: pan\_vniineft@rambler.ru**

**Abstract.** The results of the study of flow curves of various liquids and ways to reduce hydraulic resistance during flow in pipes by the addition of neutral fillers in the flow of the transported fluid are presented. Numerous studies have shown that the additives have a certain pattern: if the proportion of the additive is higher than the proportion of the carrier liquid, the onset of turbulent regime occurs earlier, if the additive lighter, than fluid, the turbulence is delayed. It has been shown that some additives significantly influence the flow resistance. Heavy oil of Kursangi oil field (Azerbaijan) with additives of polyisobutylene (PIB) of different concentrations have been investigated.

Series of studies on the effect of soluble additives on the flow curves of the dispersion medium were carried out. The study of hydraulic characteristics of

such fluids is very important due to the rather wide range of their application.

Determining of velocity gradient of fluid flow through the averaged parameters even in the pipe wall is impossible without knowledge of the velocity distribution along the radius. The fracture behavior of liquid structure largely determines the distribution of the velocity gradient in the pipe section. In the experiments ordered the destruction of the structure is observed, for which the law of distribution of velocities in the pipe section is set more accurately.

Conducted researches showed that the rheological characteristics of liquid containing soluble additives are largely dependent on their concentration. An essential feature of these liquids is that their rheological description is made by inherent dependence. Fluids with fillers are characterized by a single rheological dependence that is independent of the concentration of solid additives up to 5%.

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследования кривых течения различных жидкостей и пути снижения гидравлических сопротивлений при их течении в трубах путем добавок нейтральных наполнителей в поток транспортируемого флюида. Многочисленные исследования показали, что добавки имеют определенную закономерность: если удельный вес добавки выше, чем удельный вес несущей жидкости, то наступление турбулентного режима происходит раньше, если добавка легче жидкости, то турбулентность запаздывает. Показано, что некоторые добавки существенно влияют и на гидравлическое сопротивление. Исследованию подвергалась высоковязкая нефть месторождения Кюрсангя с добавками полиизобутилена (ПИБ) различной концентрации.

Был проведен ряд исследований, посвященных изучению влияния растворимых добавок на кривые течения дисперсионных сред. Изучение гидравлических характеристик таких жидкостей весьма актуально вследствие довольно обширной сферы их практического применения.

При движении структурообразующих жидкостей определение градиента скорости через осредненные параметры даже у стенки трубы невозможно без знания закона распределения скорости по радиусу.

Характер разрушения структуры жидкости в значительной степени определяет и распределение градиента скорости в сечении трубы. В опытах имеет место упорядоченный характер разрушения структуры, для которой закон распределения скоростей в сечении трубы устанавливается более точно.

Проведенные исследования показали, что реологические характеристики жидкостей, содержащих растворимые добавки, в значительной степени зависят от их концентрации. Существенным отличием таких жидкостей от жидкостей с нерастворимыми наполнителями состоит в том, что их реологическое описание производится присущей ей зависимостью. Жидкости с наполнителями характеризуются одной реологической зависимостью, не зависящей от концентрации твердых добавок до 5%.

**Key words:** laminar flow, turbulence, hydraulic resistance, rheological properties, filler, polyisobutylene, oil coke, viscous-elasticity, viscosity.

**Ключевые слова:** ламинарное течение, турбулентность, гидравлические сопротивления, реологические характеристики, наполнители, полиизобутилен, нефтяной кокс, вязкоупругость, вязкость.

Experiments and calculations show that distribution of liquid velocity in pipe section area under laminar flow follow the parabola law. The liquid alongside of wall adheres to the pipe and almost not moving. In contrast, in the center, where the minimum wall effect, the velocity reaches its maximum.

When a flow is moving slowly, all the bumps seem to be in the "boundary layer" and do not affect the character of the movement. Under high speed of flow, boundary layer becomes thinner and around bumps, "microvortexes" formed. Getting frustrated with tubercles, the vortices screwed into the flow and creates turbulence motion. It is clear that the effect will be the more, the higher the bumps.

It is known that under laminar flow, the resistance is less, therefore, in those cases where this is important, artificial laminarization applies.

In several studies conducted, it has been proven that various additives and physical fields can promote maintaining of laminar flow. Additives of relatively neutral matter (rubber crumb), surfactants and other soluble substances may delay the onset of turbulence.

Numerous studies have shown that additives have some pattern: if the proportion of the additive is higher than the specific gravity of the carrier fluid, the onset of turbulent regime occurs first, if the additive lighter fluid, turbulence is delayed [1, 2].

Some additives significantly affect the hydraulic resistance. The ability to control of the main hydraulic characteristics of the liquid has great practical importance and already is used in various industries.

For example, the reduction of hydraulic resistance in the flow of drilling fluids provides tangible benefits under drilling turbodrill, in the process of lifting and transport of liquids.

In mud, which drives the impeller of turbodrill, coal-alkali agent added, that allows to either reduce the pressure drop while maintaining the same power.

With variation of the hydraulic resistance under dispersion medium (slurry) flow in the pipe compared with the flow of the same fluid without filler, one of the important tasks is finding of rational formulations of the compositions and additives concentrations.

With the aim of search of most stable, not subject to aging or degradation, as well as widely manufactured matters additives of polyethylene wax particles in water and petroleum coke in oil have been tested.

As it was noted, the main objective was to find the optimum concentration of additives. At the experiments we have measured volumetric flow rate of water and mixtures of water with the addition of plastic particles (with particles diameter  $d = 2$  mm) and water with additives paraffin particles ( $d = 1.5 - 2$  mm) of the experimental facility is shown in Figure 1 consists of the following main units:

- 1 - capacity for liquids;
- 2 - pipe (length =1.5 m and diameter  $d = 0.04$  m);
- 3 – bypass;
- 4 - pump 2KN;
- 5 - 6 – valves;
- 7 - of-way for fillers;
- 8 - trap for trapping particles after transportation;
- 9 - differential manometer.

At the start of the experiment, the pipeline was filled with the transported fluid (water). The dependence of the flow rate to differential pressure  $\Delta P$  was measured. Then in the tank 1 a mixture of water with the addition of polyethylene and paraffin with different concentrations was prepared under closed valve 5 and valve 6.

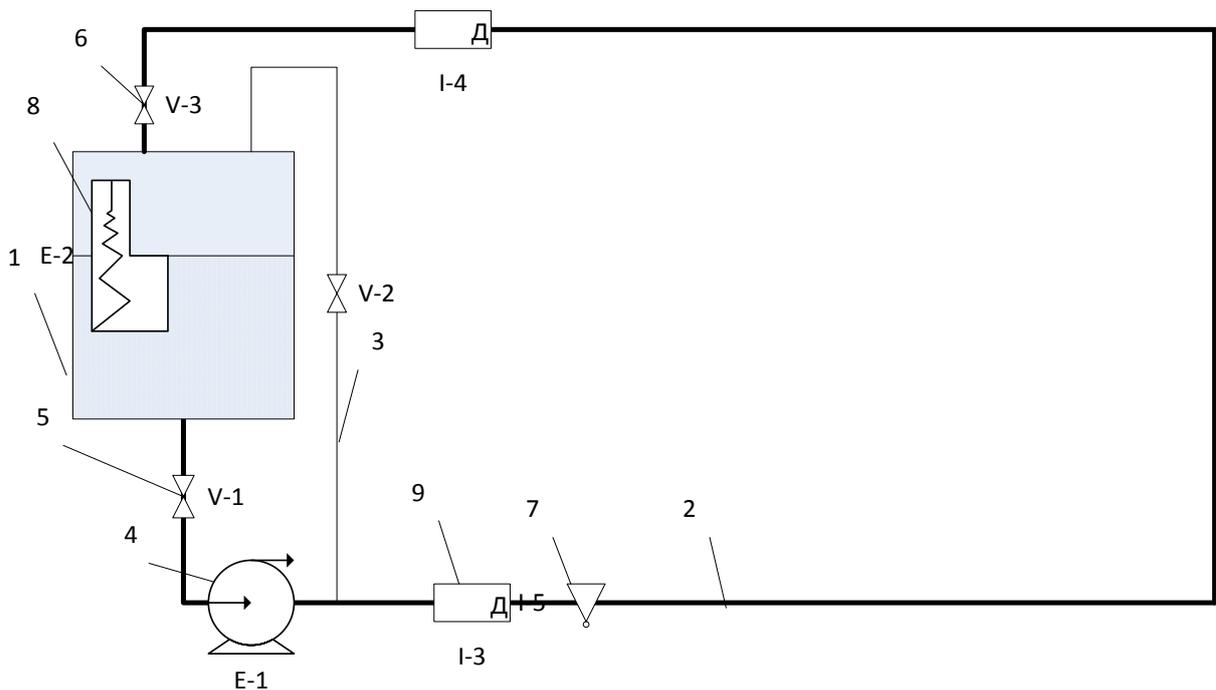


Figure 1. Scheme of experimental setup

Next, by closing the exhaust - 7, valve 5 was opened and, mixture was fed into the pipeline through the pump by measuring changes in flow rate  $Q$  to pressure drop  $\Delta P$ .

The results of the experiments are shown in Figures 2 and 3.

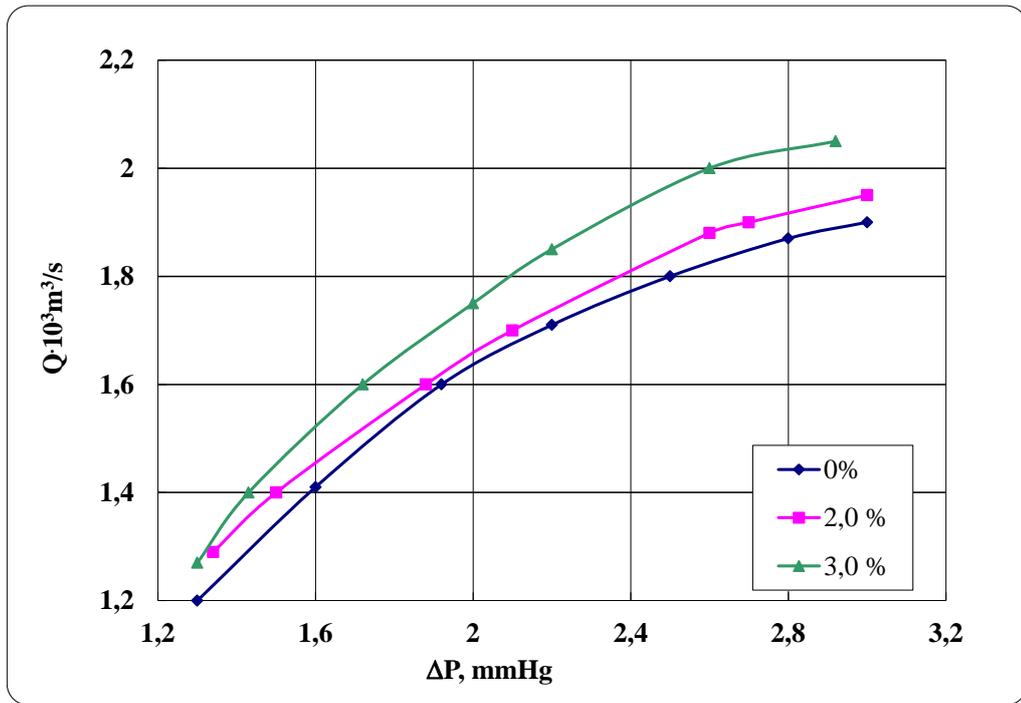


Figure 2. Flow curves of water with the addition of paraffin particles

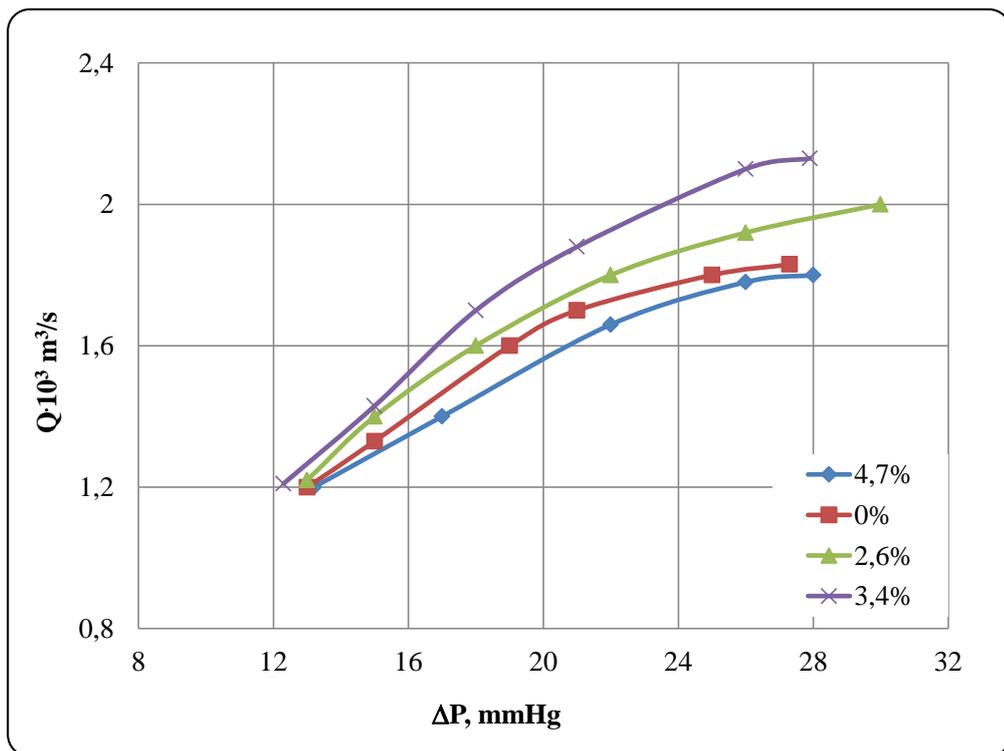


Figure 3. Flow curves of water with the addition of plastic particles

Similar experiments for mixtures of kerosene+petroleum coke (particle diameter 0.125 – 0.325 mm) and oil+petroleum coke were conducted by Prof. Bakhtizin R.N. [3]. Experimental setup with a metering area following parameters ( $d = 0.004 \text{ m}$ ;  $l = 0.45 \text{ m}$ ,  $l/d = 100$ ) was used.

For different weight concentrations of coke ( $C = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4\%$ ) curves by measuring flow rates at more than 20 different pressure drops were obtained.

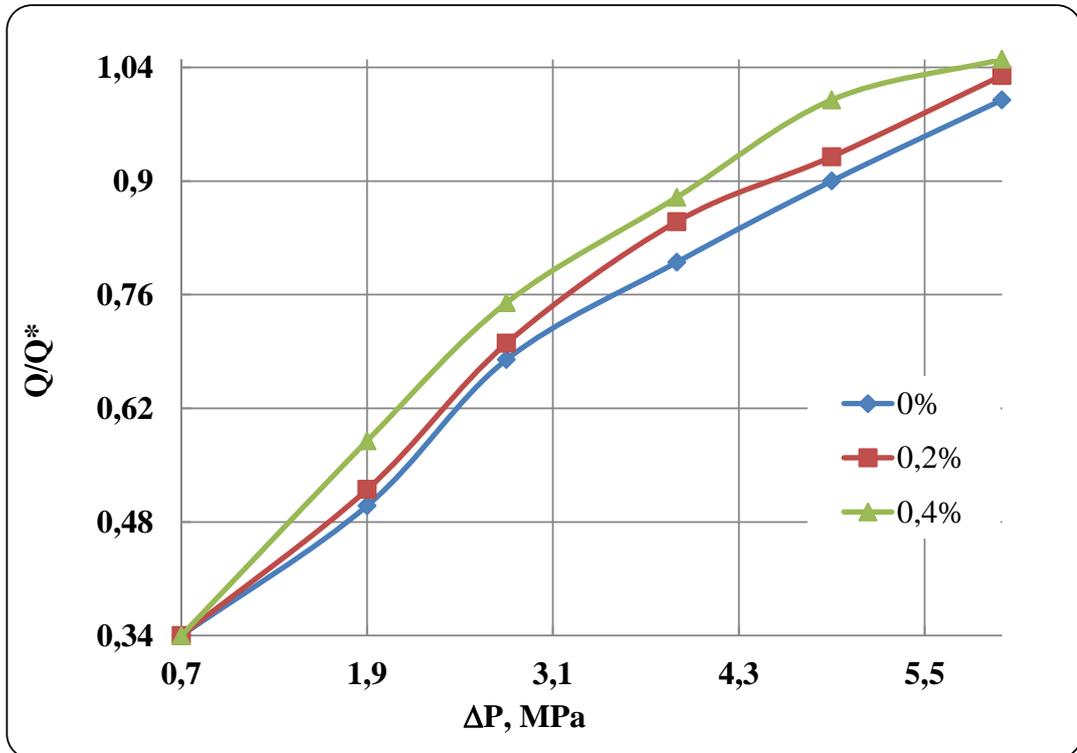


Figure 4. A flow curves for kerosene with coke additives

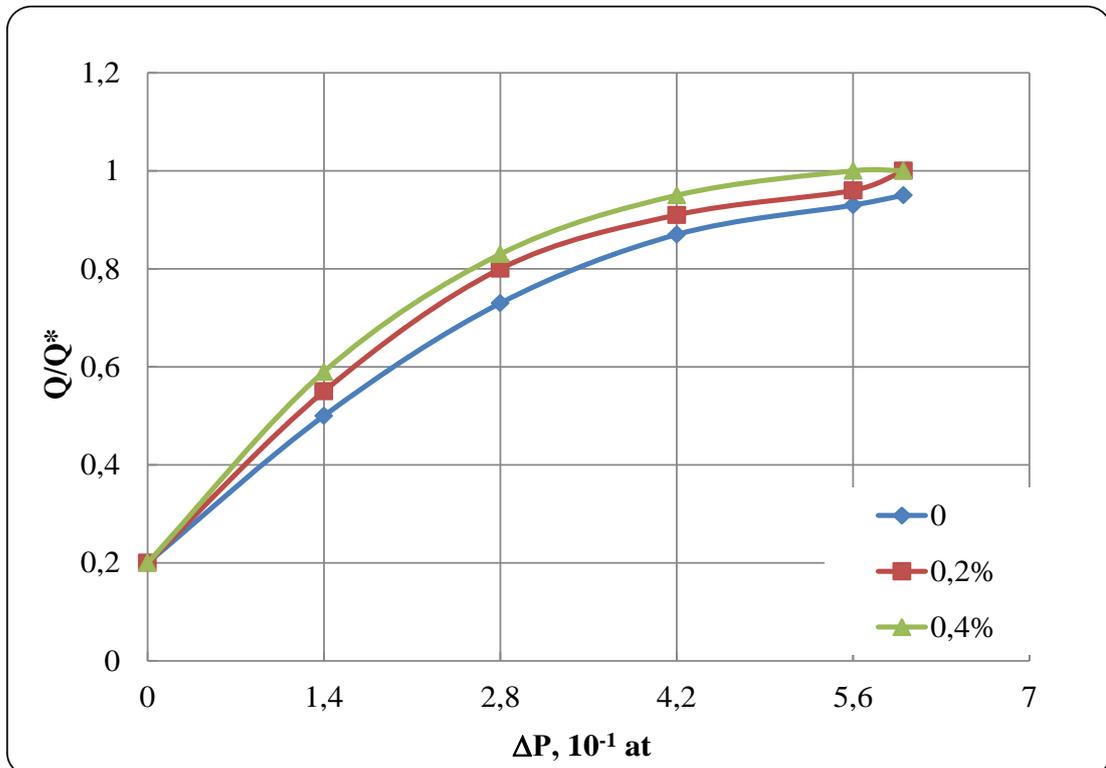


Figure 5. A flow curves for mixtures of oil with coke additives

All experimental data were processed in  $\Delta P$ ,  $Q/Q_*$  coordinates where  $Q_*$  - flow rate under the  $P = 0.5$  at and results are shown on Figures 2 - 5. As can be seen from the figures, the experimental points lie on a universal curve (independent of concentration) and describes by the equation

$$q = b\Delta P^a \quad (1)$$

Approximating  $Q_* = Q(0.5; c)$  by a polynomial  $q = b\Delta P^a$ , we obtain the relationship of volume flow from pressure drop and particle concentration

$$Q(p^c) = Q(c) b\Delta P^a \quad (2)$$

The value of Theil criterion [4] for all experimental points equal to  $0.03 \div 0.04$  and characterizes the degree of proximity approximated dependence.

Dependence (2) on  $c$  has a non-monotonic nature and if a given  $\Delta p$  exists an optimal, in the sense of reducing the hydraulic resistance,  $c = c_*$  concentration, which is easily determined by (2) equation.

In the second series of studies the effect of soluble additives on flow curves of dispersive environments was examined. It is very important to investigate the hydraulic characteristics of such fluids due to the wide area of their application. Despite numerous long-term studies, there are still questions having the discussion. It is known that the peculiarity of such liquids is that they have viscoelastic and spatial patterns in the resting state, which qualitatively distinguishes them from ordinary liquids with additives of various particulate fillers. By now a significant laboratory material accumulated for the study of rheology solvent, structured liquids. However, insufficient attention to the physical side of the process has resulted in the most varied of dependencies associated with the experiment and the interpretation of results [4 - 7].

It is known that liquids with soluble additives exhibit various phenomena: nonlinear and linear viscoelasticity, the restoration of the structure (or thixotropy); fracture patterns, etc. Therefore, during studying of that fluids flow

it is important to take into account degree of elastic recovery of the structural properties that quantitatively determines the amount of the shear stress and shows the variability of this parameter in a particular time period. Moreover, each value corresponds to  $\tau_0$  and  $\mu$ .

If this option during the research is not controlled, you can almost get the rheological curve of any nature. It is obvious that the study of the rheological characteristics of the fluids patterns changing can be diverse: this is true for the mixing pump, fluid inputing in the pipeline and so on. And the nature of the violation patterns can lead to the emergence of variant quasi-suspension with different degrees of dispersion. In other words, if the amount of liquid with recovered structure to expose disordered strain, along with volume elements with a totally destroyed structure will be exist elements with intact structure. And in the limit tends to zero the more intense the mixing process, the higher the dispersion system.

Naturally there is also ordered type of structure changes, which can be associated with a gradual increase of the pressure gradient in the pipe or smooth change in the number of turns of the rotational viscometer.

The existing diversity of  $\tau = f\left(\frac{du}{dn}\right)$  dependence arose not because these parameters are not controlled, but also due to the fact that in different settings with different nature of the fluid and different type of structures measurements researchers use the average values of the parameters in the definition of  $\frac{du}{dn}$ . So for the case of flow in a pipe is commonly used dependence

$$\frac{du}{dn} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (3)$$

where  $\frac{du}{dn}$  – velocity gradient;

$Q$  - fluid flow;  $R$  - pipe radius.

Although, as we know, the definition of the (3) expression is acceptable only for laminar mode of non-Newtonian fluid, where the distribution law of velocities over the cross section of flow is parabolic. Under structural fluid flow determination of the velocity gradient through the averaged parameters even at the pipe wall is impossible without knowledge of law of velocity distribution along the radius. But, since, as noted above, the fracture behavior of liquid structure largely determines the distribution of the velocity gradient in the pipe section, it is preferable at the experiments to have ordered destruction of the structure, for which the law of velocities distribution in the pipe section can be set more accurately.

Exploring liquid with soluble additives, it can be concluded that there are two plots of the velocity distribution for  $Q_1$  and  $Q_2$  flow rates and plots of tangential stresses, respectively, for each flow. Change of structure occurs in layers as it grows  $\tau$ . It is logical to assume that the area with the changed structure meets the following conditions:

a) the viscosity of the fluid in this area is equal to the viscosity of the modified structure ( $\mu = \mu_{pc}$ );

b) the nature of the velocity changes in this structure exactly corresponds to the case of laminar flow mode of Newtonian fluid.

The study was subjected to high-viscosity of Kursanga oil field with the addition of polyisobutylene (PIB) in various concentrations. Processing research data on the proposed scheme [5, 7] it can be obtained results, qualitatively confirming the basic provisions of the proposed hypotheses (Figure 6).

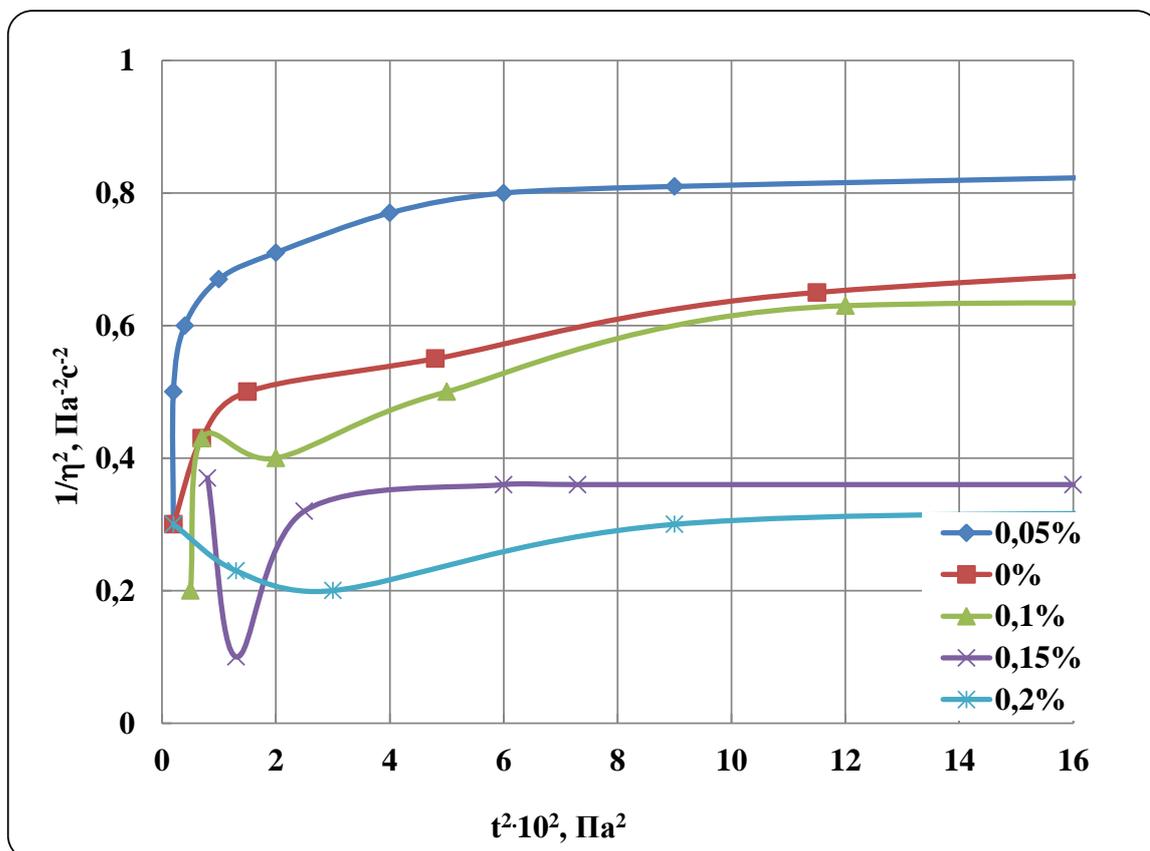


Figure 6. Rheological curves for Kursanga oil field with the additives of PIB (processed under the Cross technique)

## Conclusions

Studies have shown that the rheological characteristics of liquids containing soluble additives, largely depend on their concentration. A significant difference of such liquids from liquids with insoluble fillers is that they rheologically describes by inherent dependence. Liquid fillers are characterized by one rheological dependence does not depend on the concentration of particulate additives up to 5%.

Опыты и расчеты показывают, что при ламинарном течении скорость жидкости в сечении распределена по параболе. У стенок жидкость прилипает к трубе и практически не двигается. Напротив, в центре, где влияние стенок минимально, скорость движения достигает максимума.

Когда поток движется медленно, все бугорки располагаются как бы в «пограничном слое» и не влияют на характер движения. При высокой скорости пограничный слой становится тоньше и вокруг бугорков образуются «микрововороты». Срываясь с бугорков, вихри ввинчиваются в поток и турбулизируют движение. Очевидно, что эффект будет тем больше, чем выше бугорки.

Известно, что при ламинарном течении сопротивление движению меньше, поэтому в тех случаях, когда это важно, применяют искусственную ламинаризацию потока.

В ряде исследований, проводившихся в последние годы, установлено, что сохранению ламинарного режима может способствовать различные добавки и физические поля. Добавки такого, относительно нейтрального, материала, как резиновая крошка, ПАВ и иных растворимых веществ отдалают наступление турбулентности.

Многочисленные исследования показали, что добавки имеют определенную закономерность: если удельный вес добавки выше, чем удельный вес несущей жидкости, то наступление турбулентного режима происходит раньше, если добавка легче жидкости, то турбулентность запаздывает [1, 2].

Некоторые добавки существенно влияют и на гидравлическое сопротивление. Возможность регулирования основных гидравлических характеристик жидкости имеет большое практическое значение и уже используется в самых различных отраслях производства.

К примеру, снижение гидравлических сопротивлений при течении промывочных жидкостей дает ощутимые выгоды при бурении турбобуром, в процессах подъема и транспорта жидкостей.

В глинистый раствор, который, как известно, приводит в движение турбинки турбобура, добавляют углещелочной реагент (УШР), что позволяет уменьшить перепад давлений при сохранении прежней мощности.

При изменении гидравлического сопротивления в процессе движения такой дисперсной среды (суспензии) в трубах по сравнению с движением той же жидкости без наполнителя, одной из важных задач является нахождение рациональных рецептур составов и концентраций добавок.

С целью поиска наиболее устойчивых, не подвергающихся старению или деградации, а также широко выпускаемых промышленностью при их низкой себестоимости, были испытаны добавки типа полиэтиленовой и парафиновой частиц в воде и нефтяного кокса в нефти.

Как было отмечено выше, основная задача сводилась к нахождению оптимальной концентрации добавок.

В экспериментах замерялся объемный расход воды и смеси вода с добавками полиэтиленовых частиц (диаметр частицы  $d = 2\text{mm}$ ), а также вода с добавками парафиновых частиц ( $d = 1,5 - 2\text{ mm}$ ) на экспериментальной установке, приведенной на рисунке 1 и состоящей из следующих основных узлов:

- 1 - емкость для жидкости;
- 2 - трубопровод (длиной  $l = 1,5\text{ м}$  и диаметром  $d = 0,04\text{ м}$ );
- 3 - байпас;
- 4 - насос 2КН;
- 5 - 6 – вентили;
- 7 - отвода для наполнителей;
- 8 - ловушка для улавливания частицы, после транспортировки;
- 9 - дифференциальный манометр.

В начале эксперимента трубопровод заполняется транспортируемой жидкостью (водой). Фиксируется зависимость расхода жидкости  $Q$  от перепада давления  $\Delta P$ . После чего в емкости 1 готовят смесь (вода с

добавками полиэтилена и парафина различной концентрации) при закрытом вентиле - 5 и кране - 6.

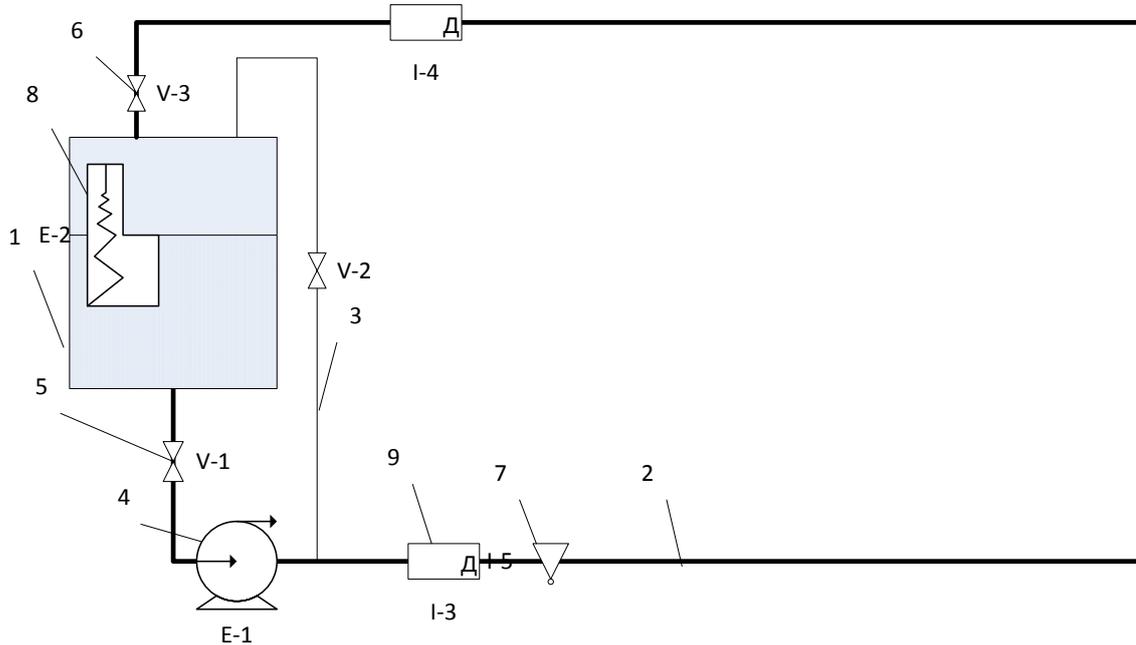


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Далее, закрывая отвод - 7, открывают краны - 5 и через насос смесь подается в трубопровод с замером изменения расхода  $Q$  от  $\Delta P$ .

Результаты экспериментов приведены на рисунках 2 и 3

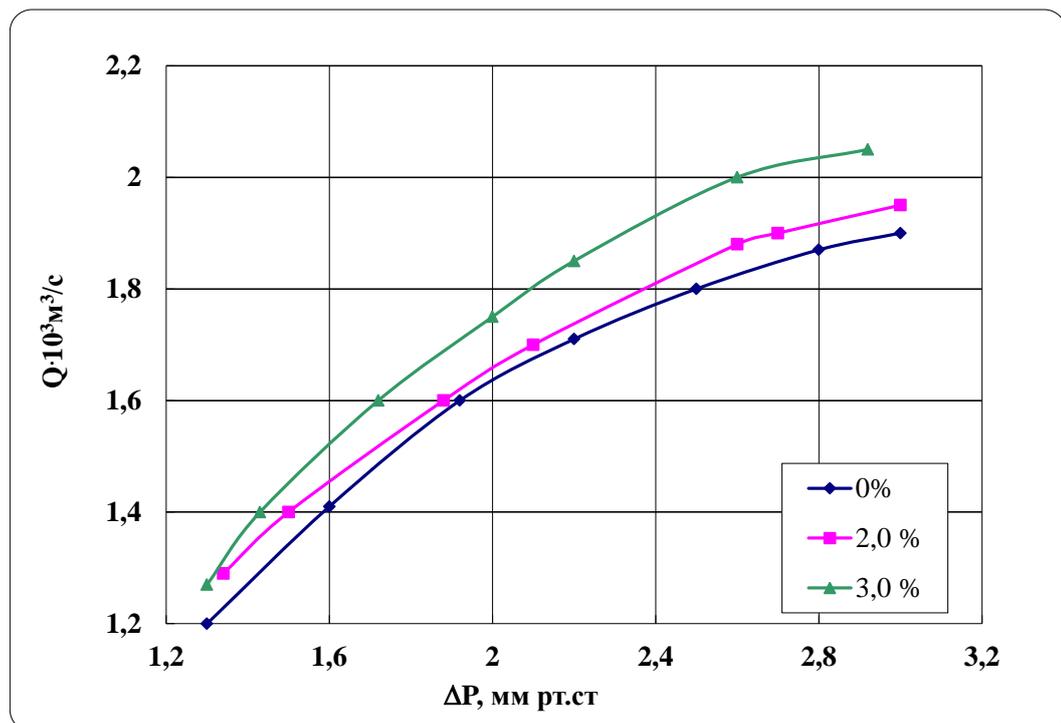


Рисунок 2. Кривые течения воды с добавками частиц парафина

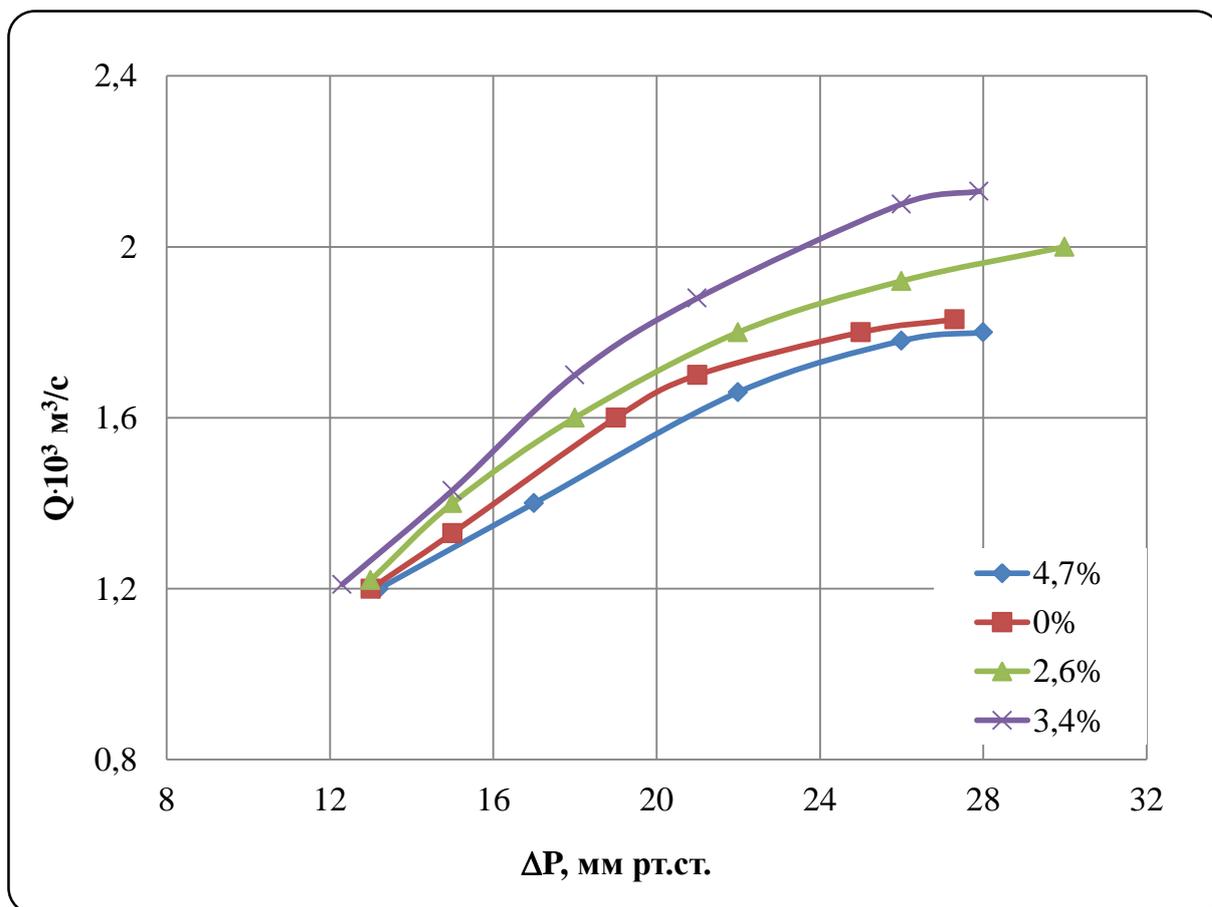


Рисунок 3. Кривые течения для воды с добавками полиэтиленовой частицы

Аналогичные эксперименты для смеси керосин+нефтяной кокс (диаметр частиц 0,125 – 0,325 мм) и нефть+нефтяной кокс были проведены проф. Бахтизиным Р.Н. [3]. При этом была использована установка с замерным участком следующих параметров ( $d = 0,004 \text{ м}$ ;  $l = 0,45 \text{ м}$ ,  $l/d = 100$ ).

Для различных весовых концентраций кокса ( $C = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4\%$ ) были получены кривые путем замеров показателей расхода при более, чем 20 различных перепадах давления  $\Delta p$ .

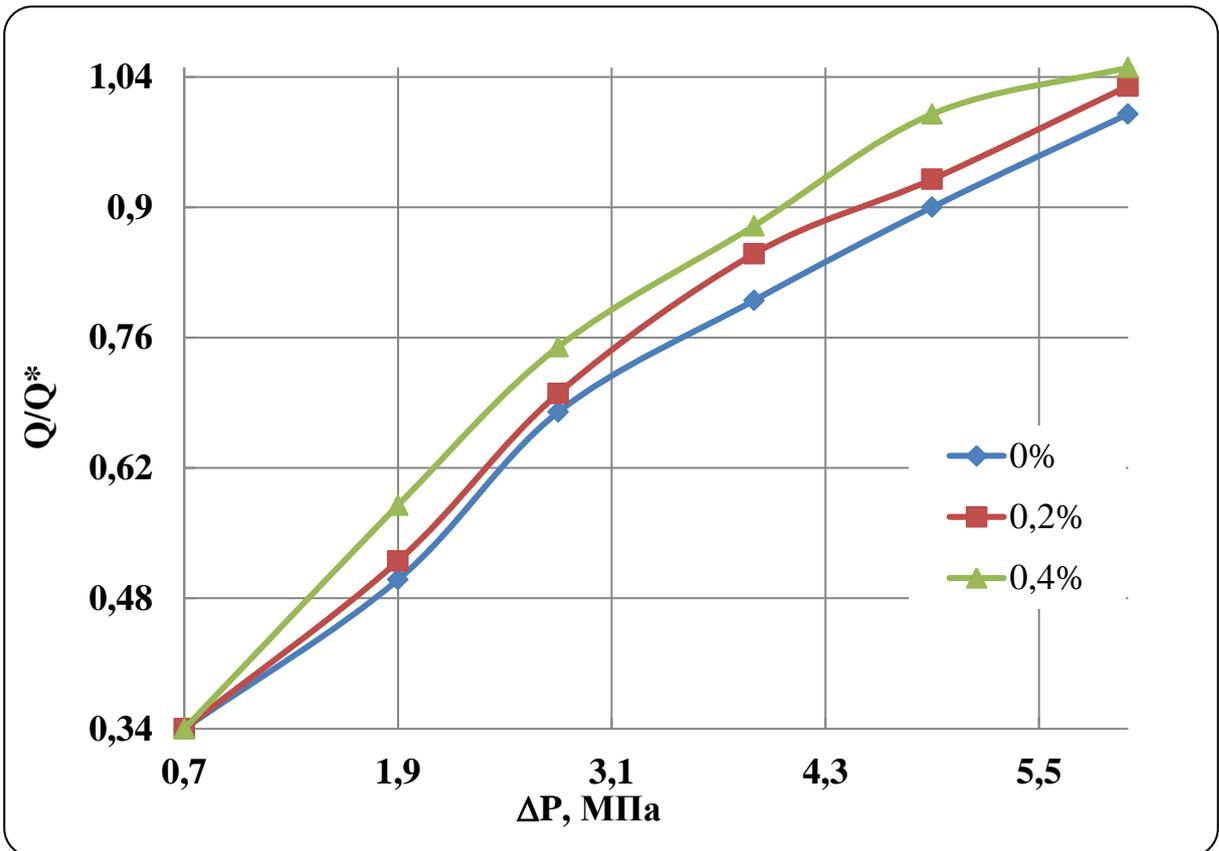


Рисунок 4. Кривые течения для керосина с добавками кокса

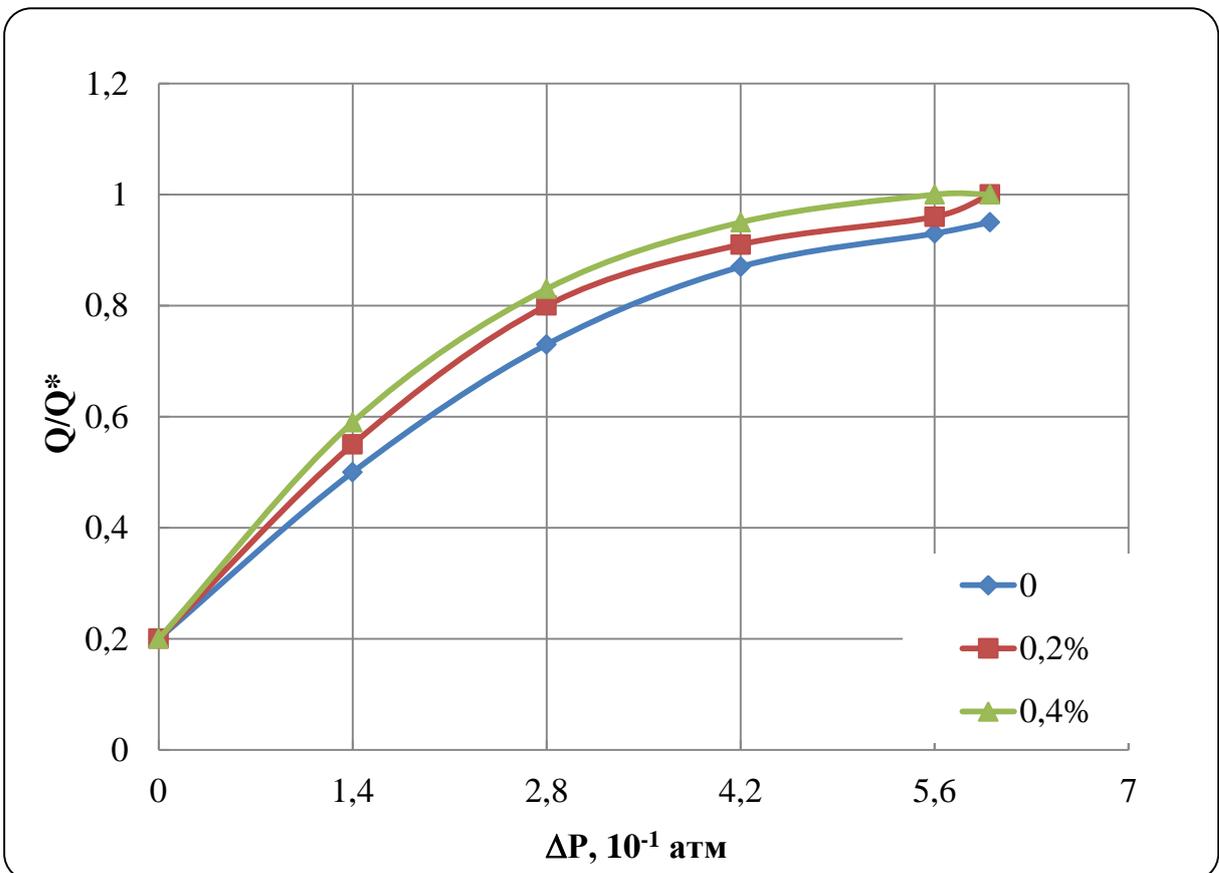


Рисунок 5. Кривые течения для смеси нефти с добавками кокса

Все экспериментальные данные были обработаны в координатах  $\Delta P$ ,  $Q/Q_*$  где  $Q_*$  - значение расхода при  $\Delta P = 0,5$  атм и приведены на рисунках 2 - 5. Как видно экспериментальные точки хорошо ложатся на одну универсальную кривую (не зависящую от концентрации), описываемую уравнением:

$$q = b\Delta P^a \quad (1)$$

Аппроксимируя  $Q_* = Q(0,5; c)$  полиномом  $q = b\Delta P^a$ , получим связь объемного расхода от перепада давления и концентрации частиц:

$$Q(p, c) = Q(c) b\Delta P^a \quad (2)$$

Значение критерия Тейла [4] по всем экспериментальным точкам равно  $0,03 \div 0,04$  и характеризует степень близости аппроксимируемой зависимости.

Зависимость (2) по  $c$  имеет немонотонный характер и при заданном значении  $\Delta p$  существует оптимальная, в смысле уменьшения гидравлического сопротивления, концентрация  $c = c_*$ , которую легко определить дифференцированием (2).

Во второй серии исследований было рассмотрено влияние растворимых добавок на кривые течения дисперсионных сред. Изучение гидравлических характеристик таких жидкостей весьма актуально вследствие довольно обширной сферы их практического применения. Несмотря на многочисленные результаты многолетних исследований, все еще существуют вопросы, носящие дискуссионный характер. Известно, что особенностью такого рода жидкостей является наличие у них вязкоупругой и пространственной структуры в состоянии покоя, что качественно отличает их от обычных жидкостей с добавками различных твердых наполнителей. К настоящему времени накоплен весомый лабораторный материал по исследованию реологии растворяющих,

структуропроявляющих жидкостей. Однако недостаточное внимание к физической стороне процесса привело к появлению самых разноречивых зависимостей, связанных как с постановкой эксперимента, так и интерпретацией полученных результатов [4 - 7].

Известно, что жидкостям с растворимыми добавками свойственны такие явления, как: нелинейная и линейная вязкоупругость, восстановление структуры (или тиксотропия) и разрушение структуры. Следовательно, при изучении движения таких жидкостей немаловажное значение имеет степень упругости восстановления структурных свойств, что количественно определяет величину, так называемого, напряжения сдвига ( $\tau_0$ ) и свидетельствует о непостоянстве этого параметра на определенном отрезке времени. Причем каждому значению соответствует свое значение  $\tau_0$  и  $\mu$ .

Если этот параметр в ходе проведения исследований не контролируется, можно практически получить реологическую кривую любого характера. Очевидно, что при изучении реологических характеристик жидкостей изменение структуры может быть разнохарактерным: оно происходит в мешалках насосов, местах ввода жидкости в трубопровод и т.д. Причем характер нарушения структуры может привести к появлению варианта квазисуспензий различной степени дисперсности. Иными словами, если объем жидкости с восстановленной структурой подвергнуть неупорядоченной деформации, то наряду с элементами объема с полностью разрушенной структурой будут присутствовать элементы и неразрушенной структуры. И чем интенсивнее процесс перемешивания, тем выше дисперсность системы, в пределе стремящаяся к нулю.

В природе существует и упорядоченный вариант изменения структуры, который может быть связан с плавным наращиванием градиента давления в трубе либо с плавным изменением чисел оборотов в ротационном вискозиметре.

Существующее многообразие зависимостей  $\tau = f\left(\frac{du}{dn}\right)$  возникло не потому, что эти параметры не контролируются, а еще и из-за того, что в различных установках с различным характером движения жидкости и различным типом измерений структур исследователи пользуются средними значениями параметров, при определении  $\frac{du}{dn}$ . Так для случая течения в трубе довольно часто используется зависимость:

$$\frac{du}{dn} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (3)$$

где  $\frac{du}{dn}$  – градиент скорости;

$Q$  - расход жидкости;

$R$  - радиус трубы.

Хотя, как известно, определение  $\frac{du}{dn}$  по выражению (3) приемлемо только в том случае, когда в трубе осуществляется ламинарный режим движения ньютоновской жидкости, где закон распределения скоростей по сечению потока - параболический. При движении структурообразующих жидкостей определение градиента скорости через осредненные параметры даже у стенки трубы невозможно без знания закона распределения скорости по радиусу. Но, поскольку, как отмечалось выше характер разрушения структуры жидкости в значительной степени определяет и распределение градиента скорости в сечении трубы в опытах предпочтительнее иметь упорядоченный характер разрушения структуры, для которой закон распределения скоростей в сечении трубы может быть установлен более точно.

Исследуя жидкости с растворимыми добавками, можно прийти к выводу, что здесь имеют место две эпюры распределения скоростей для расходов  $Q_1$  и  $Q_2$  и эпюры касательных напряжений соответственно для

каждого расхода. Изменение структуры происходит послойно по мере роста  $\tau$ . Логично предположить, что область с измененной структурой отвечает следующим условиям:

а) вязкость жидкости в этой области равна вязкости с измененной структурой ( $\mu = \mu_{pc}$ );

б) характер изменения скорости в этой структуре в точности соответствует случаю ламинарного режима течения ньютоновской жидкости.

Исследованию подвергалась высоковязкая нефть месторождения Кюрсангя с добавками полиизобутилена (ПИБ) различной концентрации. Обработывая данные исследования по предложенной схеме [5, 7] можно получить результаты, качественно подтверждающие основные положения предлагаемой гипотезы (рисунок б).

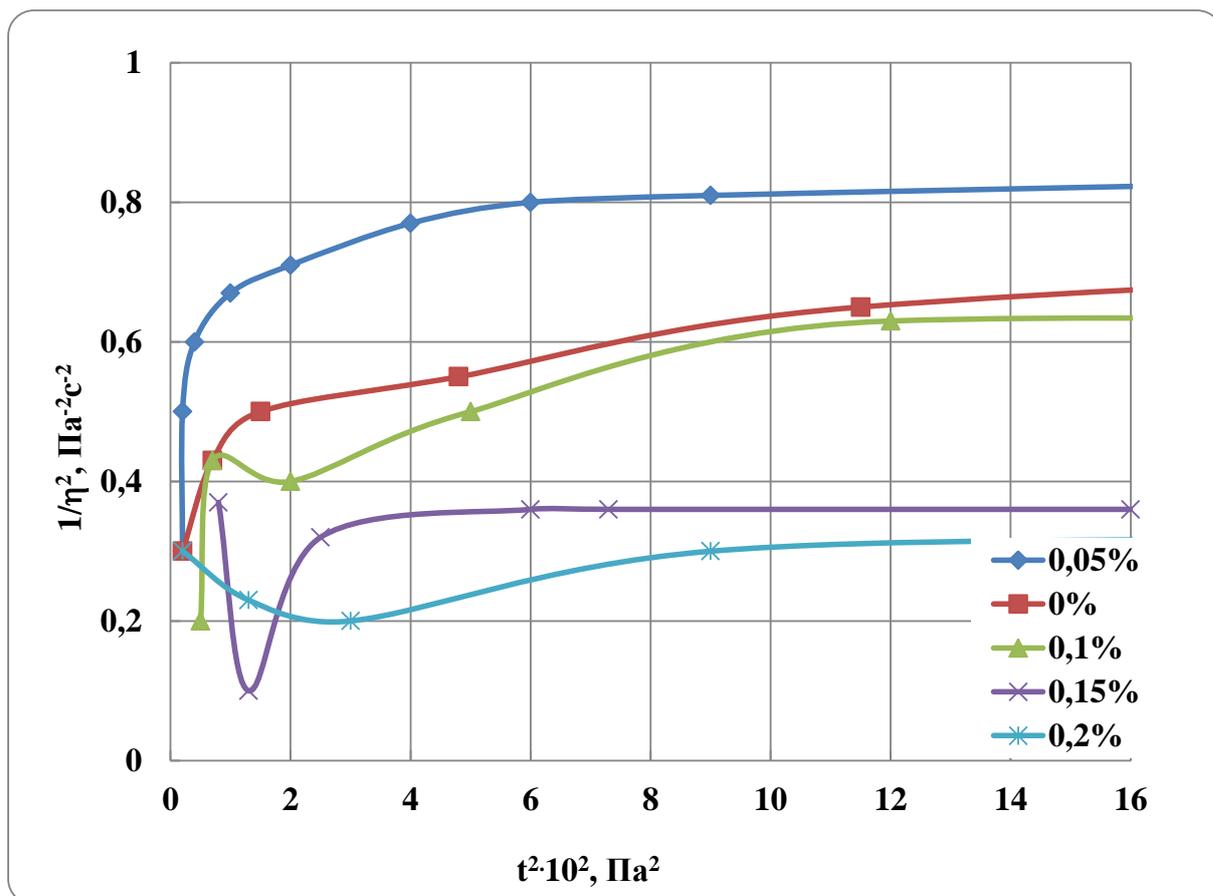


Рисунок б. Реологические зависимости - нефть месторождения Кюрсангя с добавкой ПИБ (обработка по методике Кросса)

## Заключение

Проведенные исследования показали, что реологические характеристики жидкостей, содержащих растворимые добавки, в значительной степени зависят от их концентрации. Существенным отличием таких жидкостей от жидкостей с нерастворимыми наполнителями состоит в том, что их реологическое описание производится присущей ей зависимостью. Жидкости с наполнителями характеризуются одной реологической зависимостью, не зависящей от концентрации твердых добавок до 5%.

## References

- 1 Choi K.-S., Orchard D.M. Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer // Intern. J. Exp. Thermal Fluid Sci. 1997. Vol. 15, No. 2. P. 109 - 124.
- 2 Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R et al. Turbulent drag reduction using compliant surfaces // Proc. Royal Soc., A453. - 1997. - P. 2229–2240.
- 3 Bakhtizin, R. N. The study of the processes of heat and mass transfer and inverse problems in decision making in oil and gas production: author. dis.... Dr. nat.-Mat. Sciences. Baku: the Institute of mathematics and mechanics of Azerbaijan Academy of Sciences, 1992. 37 p. [in Russian].
- 4 Mirzadjanzade A. H., M. Khasanov, M., Bakhtizin, R. N. Studies on the modeling of complex systems of production. Non-linearity, equilibrium, uncertainty: a monograph. The Ufa state petroleum technological University. Ufa: Oil and gas business, 2009. 431 p. [in Russian].
- 5 Fragments of oil and gas development/ mirzadjanzade A. H. [and others]. Baku: Elm, 1997. 408 p. [in Russian].
- 6 The Production of heavy and viscous oils/ Ametov I. M. [and others]. M: The subsoil. 1985. 240 p. [in Russian].

7 Mandrik I. E., Panahi, M., shahverdiev A. H. Scientific-methodological and technological foundations of optimization of the process of improving oil recovery. M.: Izd-vo "Oil industry", 2010. 288 p. [in Russian].

### **Список используемых источников**

1 Choi K.-S., Orchard D.M. Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer // Intern. J. Exp. Thermal Fluid Sci. 1997. Vol. 15, No. 2. P. 109 - 124.

2 Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R et al. Turbulent drag reduction using compliant surfaces // Proc. Royal Soc., A453. 1997. P. 2229-2240.

3 Бахтизин Р.Н. Исследование процессов тепломассопереноса и обратных задач при принятии решений в нефтегазодобыче: автореф. дис.... д-ра физ.-мат. наук. Баку: Институт математики и механики АН Азербайджана, 1992. 37 с.

4 Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность, неравновесность, неопределенность: монография. УГНТУ. Уфа: Нефтегазовое дело, 2009. 431 с.

5 Фрагменты разработки нефтегазовых месторождений/ Мирзаджанзаде А.Х. [и др.]. Баку: Элм, 1997. 408 с.

6 Добыча тяжелых и высоковязких нефтей/ Аметов И.М. [и др.]. М.: Недра. 1985. 240 с.

7 Мандрик И.Э., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. М.: изд-во «Нефтяное хозяйство», 2010. 288 с.

## About the authors

### Сведения об авторах

R.N. Bakhtizin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Full Member of Russian Academy of Natural Sciences, President of the Academy of Sciences of Bashkortostan, Corresponding Member of the Academy Sciences of the Republic Bashkortostan, Acting Rector of FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Бахтизин Р.Н., д-р физ.-мат. наук, профессор, действительный член РАН, Президент АН РБ, член-корр. АН РБ, и.о. ректора ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

G.M. Panahov, Doctor of Engineering Sciences, Head of "Fluid Mechanics" department of the Institute of Mathematics and Mechanics of Azerbaijan NAS, associated member of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan Republic

Панахов Г.М., д-р техн. наук, руководитель отдела «Механика жидкости и газа» Института Математики и Механики НАН Азербайджана, член-корреспондент НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

V.G. Guseynov, Institute of Mathematics and Mechanics of Azerbaijan, of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan Republic

Гусейнов В.Г., Институт математики и механики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика