

## Л и т е р а т у р а

1. Репин Е.У., Тарасова В.Н. Измерение силы трения в пограничном слое при малых и умеренных числах Рейнольдса. - Труды ЦАГИ, 1970, вып. 1218.
  2. Чикурин А.К. К вопросу об измерении напряжения трения на стенке. - Материалы научно-технической конференции. Ч.1. Февраль, 1970.
  3. Головин В.М., Сайницкий Ю.Л. С новым профиле скоростей и законе сопротивления при турбулентном движении жидкости в гладких трубах. - В сб.: Гидрогазодинамика. - Куйбышев: КуАИ, 1978.
  4. Головин В.М., Сарбатова А.Ф. К вопросу о влиянии вязкой составляющей на общее сопротивление гидравлически гладких труб при турбулентном режиме течения. - ИВУЗ. Нефть и газ. 1980, #2.
  5. Головин В.М., Юмашев Л.П. Некоторые аспекты феноменологической теории турбулентного движения жидкости в гладких трубах. - Куйбышев, 1982. - Рукопись представлена КуАИ, с. 45. Деп. в ВИНИТИ 7 сент. 1982, # 4778-62.
  6. Никурадзе И. Основные закономерности турбулентного движения в гладких трубах. - В сб.: Проблемы турбулентности. - М.: ОНТИ СССР, 1975.
  7. Прандтль Л. Механика вязкой жидкости. - В кн.: Аэродинамика Под ред. В. Доренда, т. 3. - М.: Машиностроение, 1939.
  8. Reichardt H., *Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen.* - ZAMM. 1951, 31.
  9. Blasius H. *Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsströmungen in Flüssigkeiten* Fortsch. Arb. Ing.-Wes. Berlin, 1913.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1969.

УДК 532.135

А.Д. Рудой, О.А. Ткачев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЯЗКОСТЬ  
НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Исследования реодинамики высокопарафинистых нефтей показывает, что при температурах, близких к температурам застывания, касательные напряжения в них достаточно точно описываются моделью Вингама-Шведова [1]

$$\tau = \tau_0 \operatorname{sign} \dot{\gamma} + \mu_{\text{пл}} \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — начальное напряжение сдвига;

$\mu_{\text{пл}}$  — пластическая вязкость;

$\dot{\gamma}$  — градиент скорости сдвига.

Особенность такой модели состоит в наличии начального напряжения сдвига, которое обусловлено пространственной кристаллической решеткой парафина в нефти.

Одним из эффективных путей регулирования структурно-механических свойств высокопарафинистых нефтей являются вибровоздействия [2].

Вибровоздействия позволяют практически неограниченно увеличить градиент скорости сдвига, в результате чего можно уменьшить эффективную вязкость высокопарафинистых нефтей, определяемую по формуле

$$\mu_{\text{э}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_{\text{пл}} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}. \quad (2)$$

Вибровоздействиями по способу [3], [4] была обработана высокопарафинистая нефть со следующими физико-химическими свойствами:

плотность, кг/м <sup>3</sup>	850
парафин, %	17,76
асфальтены, %	0,3
температура застывания, °С	39.

Исследования проводились в диапазоне температур нефти 16–28 °С.

Время виброобработки менялось в пределах 5–60 с. Виброэлементами служили сита из металлической проволоки с размером ячейки  $D = 4 - 8$  мм и толщиной проволоки 0,5–1,2 мм. Параметры виброобработки менялись в следующих пределах: частота колебаний сита  $h = 40 - 250$  Гц, амплитуда колебаний сита  $d = 0,5 - 2,5$  мм.

Исследования проводились на вибростенде ВЭДС-400а и на лабораторной установке, представляющей собой термостатируемый участок трубопровода диаметром 0,048 м и длиной 0,6 м. На выходе из трубопровода устанавливались виброустройства, состоящие из набора от 2 до 4-х сит [5].

Вязкость нефти определялась при помощи капиллярного вискозиметра по методу обработки результатов экспериментов в consistentных переменных [6]

$$\tau = \frac{\Delta p R}{2L}; \quad \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}, \quad (3)$$

и эффективная вязкость подсчитывалась по формуле (2).

Результаты исследований представлены на графиках (рис. 1, рис. 2).

Анализируя полученные зависимости  $\tau = f(\dot{\gamma})$  и  $\mu_e = f(\dot{\gamma})$ , можно сделать следующие выводы.

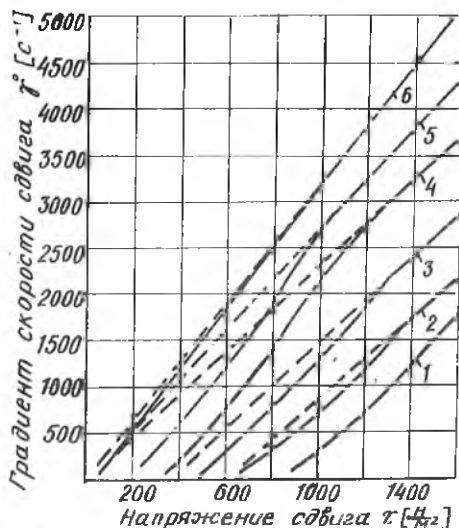


Рис. 1. Реограмма высокопарафинистой нефти при температуре 21,8°С, обработанной виброситами в течение 30 с с высокими градиентами скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , с<sup>-1</sup>: 1-1006; 2-1490; 3-2120; 4-2910; 5-3320; 6-4220; — опыт, - - - расчет

Высокопарафинистые нефти при виброобработке градиентами скорости сдвига 1000-3000 с<sup>-1</sup> проявляют нелинейные свойства, которые можно учесть моделью Балджи-Гершеля [1]:

$$\tau = \tau_0 \operatorname{sign} \dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

где  $K$  — показатель консистенции.

Для практических расчетов можно без большой погрешности использовать модель (1). Показатель степени  $n$  в уравнении (4) меняется в пределах 0,7–0,95.

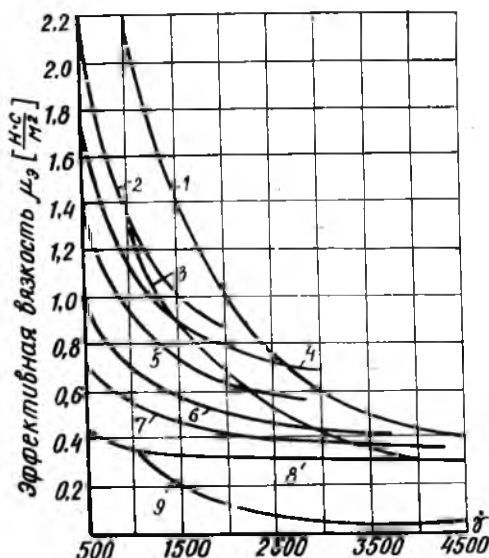


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости высокопарафинистой нефти от градиента скорости сдвига вибростита (время обработки 30 с) при температуре: 1—18,3°С; 2—21,8°С; 9—25,0°С. Кривые течения нефти ( $\mu_{eff} - \dot{\gamma}$ ) при температуре 21,8°С и различных режимах виброобработки  $\dot{\gamma}_0, c^{-1}$ : 2—1006; 4—1490; 5—2120; 6—2910; 7—3320; 8—4220

При градиентах скорости сдвига от  $3000 c^{-1}$  и выше высокопарафинистые нефти ведут себя как псевдоньютоновские жидкости, однако при малых градиентах скорости сдвига ньютоновские свойства исчезают при любых градиентах в диапазоне температур 16–25°С. В диапазоне температур 25–28°С нефть при обработке градиентами вибростита, большими  $3000 c^{-1}$ , проявляет ньютоновские свойства.

Изменение эффективной вязкости высокопарафинистых нефтей в зависимости от градиента скорости сдвига вибростита при изменении их

свойств от модели (I) к модели (5) можно обобщить эмпирической формулой.

$$\mu = \mu_m + (\mu_0 - \mu_m) \frac{1}{1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $\mu_m$  - минимальная вязкость при  $\dot{\gamma}_{max}$  ;  
 $\mu_0$  - максимальная вязкость при  $\dot{\gamma}_0$  .

Формула (5) аналогична формуле Филиппова [7], однако вместо напряжения сдвига в качестве параметра выбран  $\dot{\gamma}$ , поскольку вязкости сравнивались при  $\tau = const$ .

Физическое моделирование процесса обработки высокопарафинистых нефтей виброситами позволило выявить основные факторы, оказывающие влияние на структурную (аффективную) вязкость нефти:

$$f(\bar{V}_B; R; \rho; \mu_3^B; T; t_B) = 0, \quad (6)$$

где  $\bar{V}_B$  - среднеквадратичная скорость вибрации;  $\bar{V}_B = \frac{2\pi na}{\sqrt{2}}$ ; (7)

$R_2 = \frac{D_B^2}{4}$  - гидравлический радиус ячейки сита;

$\rho$  - плотность;

$\mu_3^B$  - аффективная вязкость нефтей, обработанных в виброситах;

$t_B$  - время виброобработки;

$T$  - число тиксотропии;  $T = \frac{\tau_{уст} - \tau_{уст.р.}}{\tau_{уст} t_B}$ .

Применение к (6) метода анализа размерностей позволило получить следующую критериальную зависимость:

$$T_B = f(Re; Sh),$$

где  $T_B = \frac{TR}{\bar{V}_B}$  - число вибротиксотропии;

$Re = \frac{\bar{V}_B R \rho}{\mu_3^B}$  - число Рейнольдса;

$Sh = \frac{\bar{V}_B t_B}{R}$  - число Струхала.

По экспериментальным данным были получены зависимости (рис. 3, рис. 4).

$$T_B = 2,3 \cdot 10^9 \exp(0,829 - 0,005 Re - 0,46 \cdot 10^{-5} Sh).$$

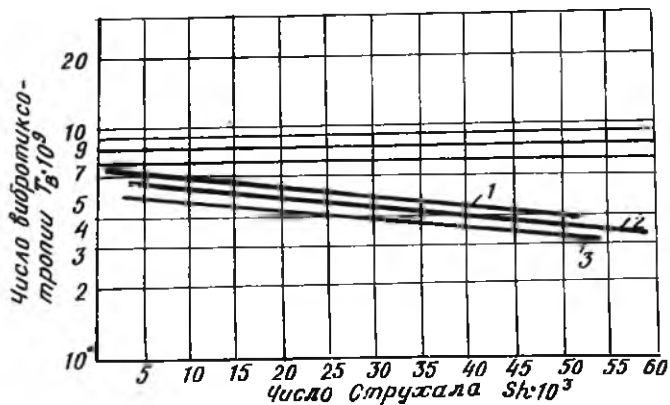
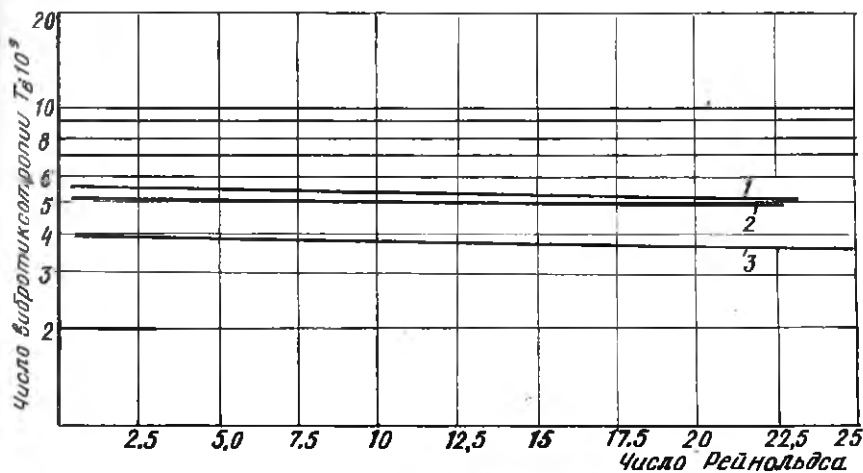


Рис. 3. Зависимость числа вибротиксотропии от числа Стружала при числах Рейнольдса: 1- 1; 2- 8; 3-19



Р и с. 4. Зависимость числа вибротиксотропии от числа Рейнольдса при числах Стружала: 1 - 5000; 2 - 9500; 3 - 4500

Экспоненциальный характер зависимости свидетельствует о существовании асимптотического приближения свойств нефти после виброобра-

ботки к системе с полностью разрушенной структурой, подчиняющейся закону пропорциональности Ньютона. Параметры виброобработки ограничены режимом, при котором нефть начинает нагреваться.

Экспериментальная часть вискозиметрии требует значительных затрат времени, навыка и обязательного отбора проб, что в условиях трубопроводного транспорта сопряжено с определенными трудностями. Особый интерес представляет собой проблема измерения эффективной вязкости высокопарафинистых нефтей, обработанных виброститами [8], поскольку сложно создать идентичные параметры вибровоздействий в реальном потоке и в отобраных на вискозиметрию пробах.

В то же время в условиях подготовки высокопарафинистых нефтей к перекачке методом механической обработки в виброститах очень важно оценить ее эффективную вязкость. Поэтому попытка разработать метод расчета вибровязкости в зависимости от параметров вибровоздействий представляется заслуживающей внимания.

Рассмотрим течение высокопарафинистой структурированной нефти (охлажденной на 5–10°C меньше температуры застывания) через равномерно распределенное по сечению сито из металлической круглой проволоки, которое совершает возвратно-поступательные колебания вдоль оси потока (рис. 5).

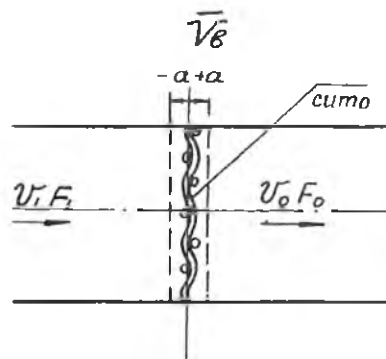


Рис. 5. Схема колебаний вибростита

Параметры вибрации:

- $n$  — частота колебаний;
- $a$  — амплитуда колебаний;

Коэффициент сопротивления рассматриваемого сита  $\zeta$  является функцией  $\frac{\sum f_{0mb}}{F_1}$ , где  $F_1$  — живое сечение:

$$f = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\sum f_{0mb}}{F_1},$$

а также числа Рейнольдса [9]

$$Re = \frac{v_0 \delta}{\nu}$$

или для реологических жидкостей — обобщенного числа Рейнольдса

$$Re^3 = \frac{v_0 \delta^3 \rho}{\mu_3}, \quad (8)$$

где  $v_0$  - скорость в живом сечении сита;  
 $\delta$  - средняя толщина проволоки сита ( $\delta \approx 1$  мм);  
 $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости.

Поскольку при течении через равномерно распределенное по сечению сито скорость в живом сечении будет равна скорости в единичной ячейке, рассмотрим силы, возникающие в этой ячейке при внутреннем обтекании нефтью ее проволоочного контура (рис. 6).

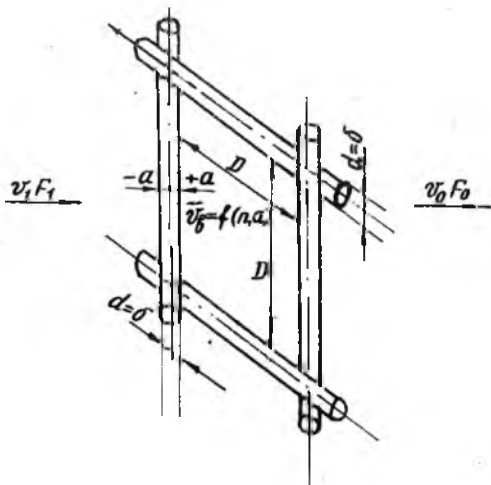


Рис. 6. Обтекание единичной ячейки

Структура парафина в нефти разрушается перемещающимся проволоочным контуром, т.е. зависит от параметров вибрации, зоны вибровоздействия, режима виброобработки, кавитации, возникающей при обтекании проволоки сита и в меньшей степени от скорости продавливания нефти через вибросито.

Скорость перемещения самого вибросита через неподвижную нефть  $v_1$  или, идентично, скорость продавливания нефти через вибросито, необходимая и достаточная для эффективного снижения вязкости, как показали опыты, лежит в пределах от 0,01 до 0,03 м/с.

Необходимая и достаточная среднеквадратичная скорость вибрации сита  $\bar{V}_g$ , определяемая по формуле (7), лежит в пределах 0,4 - 1,5 м/с.



Поскольку  $\bar{V}_f > v_f$  на порядок, за определяющую скорость примем в дальнейших расчетах  $\bar{V}_f$ , а скорость  $v_f$  в первом приближении пренебрежем, т.е. скорость потока нефти приравняем среднеквадратичной скорости вибрации:  $v_f = \bar{V}_f$ . Тогда, с учетом того, что для проволочного сита  $\delta = d$ , а также (7), перепишем (8) в виде

$$Re^3 = \frac{2\pi n a d \rho}{\sqrt{2} \mu_3}, \quad (9)$$

где  $d$  - диаметр проволоки сита.

Считаем, что перепад давления на сите в первом приближении уравновешивается начальным напряжением на проволоках вибрирующей ячейки. Поэтому запишем

$$\Delta p D^2 = \tau 4D \frac{\pi d}{2} = 2\pi d \tau D, \quad (10)$$

где  $\Delta p$  - перепад давления на сите;

$D$  - размер ячейки сита.

Решая (10) относительно  $\tau$  с учетом, что  $\Delta p = K_{Re} \xi \frac{\rho \bar{V}_f^2}{2}$ , получим:

$$\tau = \frac{1}{2} K_{Re} \xi \frac{\rho}{2} \left( \frac{2\pi n a}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{D^2}{D} \frac{1}{\pi d} = K_{Re} \xi \frac{\pi}{2} \rho n^2 a^2 \frac{D}{d}, \quad (11)$$

где  $K_{Re}$  - поправка на число Рейнольдса.

Градиент скорости сдвига нефти определим как функцию гидравлического радиуса ячейки сита ( $R = \frac{D}{4}$ ) по формуле [10]:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{4\bar{V}_f}{R} = \frac{4}{R} \frac{2\pi n a}{\sqrt{2}} = \frac{32\pi n a}{D\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Эффективную вязкость, определяемую по формуле  $\mu_3 = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_s}$ , с учетом (11) и (12) окончательно запишем в виде

$$\begin{aligned} \mu_3 &= K_{Re} \xi \frac{\pi}{2} \rho n^2 a^2 \frac{D}{d} \frac{D\sqrt{2}}{32\pi n a} = K_{Re} \xi \frac{\sqrt{2}}{64} \rho n a \frac{D^2}{d} = \\ &= 0,022 K_{Re} \xi \rho n a \frac{D^2}{d}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку виброобработка высокопарафинистой нефти эффективна при температуре нефти на 5-10°C меньшей температуры застывания, т.е. в интервале температур 18-25°C, плотность высокопарафинистой нефти в формуле (13) можно принять величиной постоянной и равной 850 кг/м<sup>3</sup> (в указанном интервале температур плотность изменяется на 1%).

Лабораторные исследования показали, что максимальная необходимая и достаточная скорость виброобработки  $\bar{V}_B$  не превышает 2,0 м/с.

С учетом вышеизложенного, а также принимая во внимание, что вязкость  $\mu_2$  нефти после виброобработки колеблется в пределах 0,5-0,04 нс/м<sup>2</sup>, определим  $Re_{max}^3$  по формуле (8):

$$Re_{max}^3 = \frac{2,0 \times 850 \times 0,001}{0,04} = 42,5.$$

Таким образом, расчеты коэффициента гидравлического сопротивления можно производить по формулам для  $Re^3 < 50$  [9]. В диапазоне коэффициента живого сечения вибросита  $\bar{F} = 0,5 - 0,7$ :

$$\zeta = \frac{\Delta P}{\rho \bar{V}_B^2} = 1,3(1-\bar{F}) + \left(\frac{1}{\bar{F}} - 1\right)^2 = 1,01.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления вибросита с учетом числа  $Re^3$  подсчитывается по формуле [9]:

$$\zeta' = k_{Re} \zeta = \frac{22}{Re^3} + \zeta. \quad (14)$$

С учетом (14) формула (13) примет окончательный вид

$$\mu_2 = 0,022 \left( \frac{22}{Re^3} + \zeta \right) \rho n a \frac{D^2}{d}. \quad (15)$$

Для сит, выполненных в форме полусферы, в качестве определяющего размера ячейки сита  $D$  можно принять размер ячейки сита в свету  $D$ , который подсчитывается по формуле

$$D = \frac{D_c - \left[ \left( \frac{\pi R_c - d}{D + d} \right) + 1 \right] d}{\frac{\pi R_c - d}{D + d}},$$

где  $D_c$  - диаметр сита.

Расхождение между вязкостью  $\mu_2$ , подсчитанной по формулам (9) и (15) методом последовательных приближений, и вязкостью  $\mu_{оп}$ , полученной вискозиметрическими замерами, составляет 10-20% (рис. 7).

Таким образом, формула (15) вполне пригодна для расчета эффективной вибровязкости после виброобработки высокопарафинистой нефти в целях подготовки ее к перекачке.

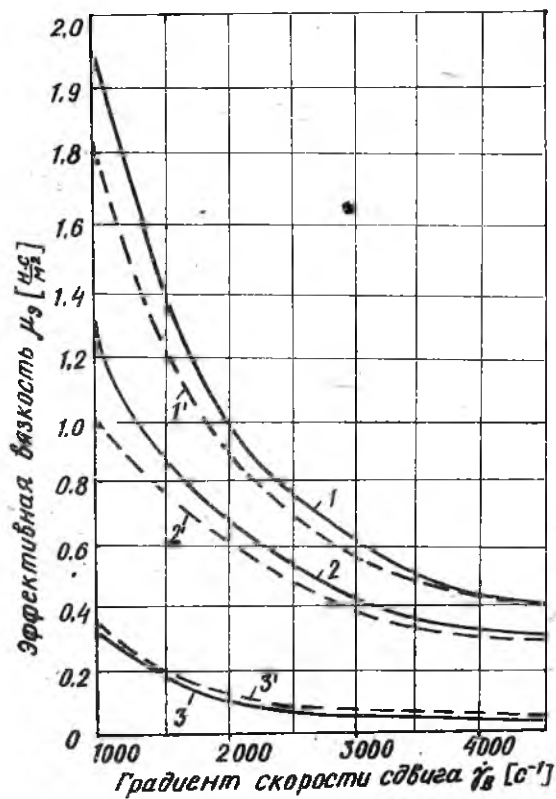


Рис. 7. Зависимость вязкости высокопарафинистой нефти от градиента скорости сдвига вибросист при температуре:  
 1- 18,3°C; 2- 21,8°C; 3- 25°C;  
 — эксперимент; - - - расчет

## Л и т е р а т у р а

1. Шульман Э.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. - М.: Энергия, 1975.
2. Урьев Н.Б., Дубинин И.С. Коллоидные цементные растворы. - Л.: Стройиздат, 1980.
3. А. с. 571657(СССР). Способ подготовки высокопарафинистой нефти для перекачки. Маяцкий Г.А., Голованов О.М., Рудой А.Д. и др. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 33.
4. Способ подготовки высокопарафинистых мангышлакских нефтей к откачке из земляных емкостей /Маяцкий Г.А., Рудой А.Д., Ткачев О.А. и др. - Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1976, №9.
5. А.с. 868232 (СССР). Устройство для подготовки высокопарафинистых нефтей и нефтепродуктов к перекачке/Г.А.Маяцкий, А.Д. Рудой, О.М.Голованов, О.А.Ткачев и др.- Оpubл. в Б.И., 1981, №36.
6. Исследование реологических свойств жидких лакокрасочных материалов /Смольский Б.М., Шульман Э.П., Гориславец В.М. и др.- В кн.: Тепло- и массоперенос в неньютоновских жидкостях. - М.: Энергия, 1968.
7. Овчинников П.Ф., Михайлов Н.В. Формулы эффективной вязкости структурированных жидкостей с учетом тиксотропии.- Коллоидный журнал, 1970, XXXI, №3.
8. Транспортировка высокопарафинистых нефтей, подготовленных в виброустановках/Голованов О.М., Рудой А.Д., Ткачев О.А. и др.- Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1982, №11.
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.- М.: Машиностроение, 1975.
10. Астарита Д., Марручи Д. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей.- М.: Мир, 1978.

УДК 632.556.43

М.В. Цыганов

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО РАДИАЛЬНОГО ДИФфуЗОРА

Продувки ряда радиальных диффузоров с односторонним подводом воздуха (степень расширения 5,5) показали, что для получения равномерного