

Министерство образования Российской Федерации



Ухтинский государственный технический университет

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

*Методические указания к выполнению
компьютерной лабораторной работы*



Ухта 2003

ББК 22.253 Я7
Р18
УДК 532.076.

Раинкина Л.Н. Исследование режимов движения жидкостей: Методические указания.- Ухта: УГТУ, 2003. - 24с., ил.

Методические указания предназначены для студентов специальностей: 170400-”Машины лесного комплекса”, 260200-”Лесоинженерное дело, 090800-”Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений”, 090900-”Бурение скважин”, 090700-”Проектирование и эксплуатация магистральных газопроводов”, 290300-”Промышленное и гражданское строительство”, 170200 - “Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов”, 290900- “Теплогазоснабжение и вентиляция”.

В методических указаниях приведены схемы опытов и методика их проведения, основы теории, вопросы и задачи для контроля знаний студентов при защите лабораторной работы.

Содержание указаний соответствует рабочей учебной программе.

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой РЭНГМ и ПГ (протокол № 8 от 20.12.2002.).

Рецензент Мордвинов А. А., доцент кафедры РЭНГМ и ПГ.
Редактор Санина Г. И.

В методических указаниях учтены замечания рецензента и редактора.

План 2003г., позиция 131.

Подписано в печать 05.03.03. Компьютерный набор.

Объем 24с. Тираж 100экз. Заказ №167.

© Ухтинский государственный технический университет, 2003
169300, г. Ухта. ул. Первомайская, 13.
Отдел оперативной полиграфии УГТУ
169300, г. Ухта. ул. Октябрьская, 13.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ | 4 |
| 1.1. Вязкость | 4 |
| 1.2. Ньютоновские и неньютоновские жидкости | 6 |
| 1.3. Вязкость газов..... | 8 |
| 1.4. Расход. Закон сохранения массы | 8 |
| 1.5. Режимы движения жидкости..... | 9 |
| 1.5.1. Критерий Рейнольдса и его физическая интерпретация | 9 |
| 1.5.2. Определение режима движения жидкостей | 11 |
| 1.5.3. Задача | 12 |
| 2. ЭКСПЕРИМЕНТ | 16 |
| 2.1. Цель эксперимента | 16 |
| 2.2. Порядок проведения эксперимента..... | 16 |
| 2.3. Обработка результатов эксперимента и подготовка отчета | 17 |
| 3. ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ | 19 |
| 3.1. Заполнить таблицу..... | 19 |
| 3.1. Контрольные вопросы | 20 |
| 3.1. Задачи к защите лабораторной работы | 21 |



1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

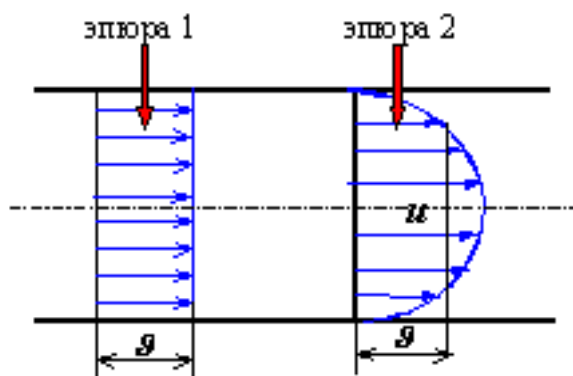
1.1. Вязкость

Движение - поток молекул вещества, перемещающихся в одном направлении под действием касательных сил (сил в направлении движения).

Область пространства конечных размеров, занятая движущейся жидкостью, называется **поток**.

Существует **две модели** жидкости - **идеальная** и **реальная**. Первая из них предполагает, что между молекулами жидкости при движении нет взаимодействия, поток не деформируется и в нем не возникает реакции на внешнее воздействие (касательных напряжений).

Поток жидкости можно представить в виде совокупности элементарных струек. **Элементарная струйка** - часть потока движущейся жидкости с бесконечно малой площадью поперечного сечения. Для идеальной жидкости все струйки в сечении потока имеют одну и ту же скорость \mathcal{V} (эпюра 1, рис.1).



u - местная скорость в сечении $d\omega$ элементарной струйки;

\mathcal{V} - средняя скорость;

$Q = \int u d\omega = \mathcal{V} \cdot \omega$ - объёмный расход в сечении ω потока жидкости.

Расход - количество жидкости, проходящее через сечение потока за единицу времени.

Рис.1. Эпюра скоростей в сечении потока жидкости

При движении реальной жидкости наблюдается явление "прилипания" - скорость частичек жидкости на неподвижной твердой границе равна нулю (эпюра 2). Это объясняется тем, что притяжение между молекулами твердого тела и жидкости больше, чем между молекулами самой жидкости. Молекулы твердого тела притягивают молекулы жидкости, лежащие на поверхности, и останавливают их. Остановленные молекулы жидкости, в свою очередь, тормозят движение находящихся рядом с ними соседей. Влияние твердой границы распространяется в той или иной степени на всю жидкость, проходящую через сечение потока, при этом устанавливается распределение скоростей по сечению, которое и называется эпюрой.

Для оценки скорости движения всего потока жидкости в сечении вводится средняя скорость \mathcal{V} таким образом, чтобы расход жидкости остался неизменным и

равным таковому при реальном распределении скоростей. Для идеальной жидкости скорости всех струек равны средней скорости \bar{u} .

Вследствие разницы скоростей между жидкостью и стенкой, а также между отдельными слоями жидкости появляется **сила трения**, которая препятствует движению.

Итак, распределение скоростей по сечению, и, следовательно, сила трения обязаны своим появлением наличию сил межмолекулярного сцепления при сдвиговой деформации, количественным выражением которых является **вязкость**.

Вязкость - количественная характеристика сил межмолекулярного взаимодействия при сдвиговой деформации (при движении жидкости).

Вязкость изменяется при изменении структуры жидкости.

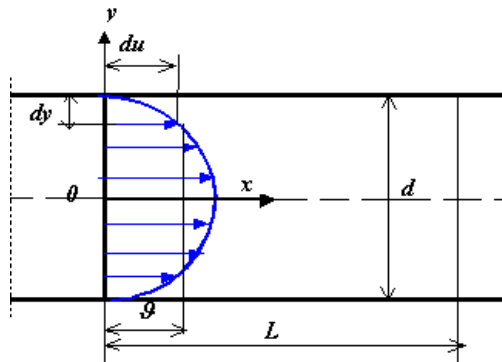


Рис. 2. Иллюстрация к определению силы трения

Величина (модуль) силы трения, возникающей между слоем жидкости толщиной dy и стенкой на длине L (рис. 2) определяется так:

$$T = \left| \eta \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \frac{du}{dy} \right| \quad (1)$$

где $\omega_{\text{тр}} = \pi \cdot d \cdot L$ - поверхность трения; du - изменение скорости; dy - толщина слоя; η (этта) - динамический коэффициент вязкости жидкости, имеет размерность Па·с.

Величина du/dy - это градиент скорости (производная от скорости по нормали) или скорость сдвига слоев.

В практических расчетах часто встречается соотношение η/ρ , которое называется кинематическим коэффициентом вязкости (обозначается ν (ню), имеет размерность $\text{м}^2/\text{с}$ в системе СИ).

$$\nu = \eta/\rho \quad (2)$$

Вязкость всех жидкостей зависит от температуры, причем при увеличении температуры она уменьшается (жидкость расширяется, увеличиваются расстояния между молекулами и ослабевает взаимодействие между ними, то есть вязкость).

В справочной литературе приводятся коэффициенты ν в зависимости от температуры в виде таблицы или графика.

Вязкость при любой температуре определяется по формуле:

$$\nu_t = \nu_{20} \cdot e^{\beta \cdot (t-20)}; \quad (3)$$

$$\beta = 1/(t_2 - t_1) \cdot \ln (\nu_{t_2}/\nu_{t_1}), \quad (4)$$

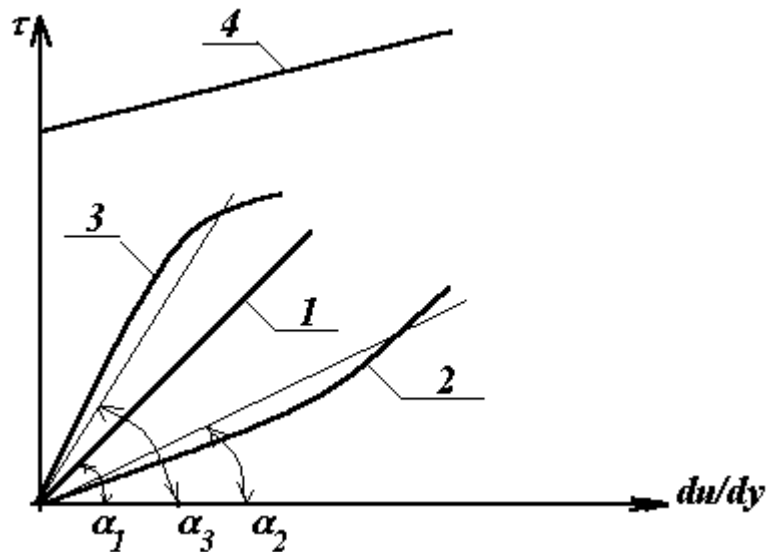
где $\nu_{t1}, \nu_{t2}, \nu_{20}$ - коэффициенты вязкости при температурах t_1, t_2 и 20°C соответственно. Кинематический коэффициент вязкости ν в справочной литературе обычно приводится в стоксах (Ст(стокс) = $\text{см}^2/\text{с} = 10^{-4}\text{м}^2/\text{с}$).

1. 2. Ньютоновские и неньютоновские жидкости

Зависимость касательных напряжения в жидкости $\tau = T/\omega_{\text{тр}}$ от скорости сдвига согласно уравнению (1) представляется в виде:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (5)$$

Графическое изображение уравнения (5) называется *кривой течения*



1 - ньютоновские жидкости ; 2, 3, 4- неньютоновские жидкости

Рис. 3. Кривые течения

На рис. 3. изображены кривые течения для разных жидкостей. Отметим, что величина du/dy *прямо пропорциональна средней скорости движения* \mathcal{Q} . Вид этих кривых зависит от того, как меняется вязкость при увеличении градиента скорости du/dy (или \mathcal{Q}). В зависимости от этого жидкости подразделяются на две группы.

Ньютоновские жидкости - это те, для которых *вязкость есть величина постоянная во всем диапазоне скоростей движения* (линия 1). Это жидкости с простой внутренней структурой (вода, керосин, бензин и др.). Для таких жидкостей изменение скорости движения не приводит к изменению структуры, то есть вязкости ($\eta = \text{tg } \alpha_1 = \text{const}$ - для линии 1).

Неньютоновские жидкости - это *жидкости с переменной вязкостью, которая зависит от скорости движения*. К ним относятся жидкости органического происхождения, а также смеси ньютоновских жидкостей и твердых частиц. Они имеют сложную внутреннюю структуру. У таких жидкостей по мере роста скорости изменяется сама структура и, следовательно, мера взаимодействия молекул при сдвиговой деформации, то есть вязкость.

Неньютоновские жидкости группируются по трем основным категориям.

1). Неньютоновские вязкие жидкости, для которых скорость сдвига зависит только от приложенных напряжений.

2). Жидкости, для которых скорость сдвига зависит не только от касательного напряжения, но и от продолжительности его действия.

3). Вязкоупругие жидкости, проявляющие вязкость и упругость при сдвиге.

На рис. 3 представлены кривые течения для неньютоновских вязких жидкостей (1^{ая} группа).

Так, у дилатантных жидкостей с ростом скорости вязкость возрастает (угол α_2 увеличивается, кривая 2), у псевдопластичных жидкостей вязкость убывает (угол α_3 уменьшается, кривая 3).

В нефтегазовом деле широко применяется модель **вязкопластичной жидкости** (или **жидкости Шведова-Бингама**). Для вязкопластичных жидкостей (линия 4, рис. 3 и рис. 4) зависимость $\tau=f(du/dy)$ имеет вид:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (3)$$

где τ_0 - начальное напряжение сдвига.

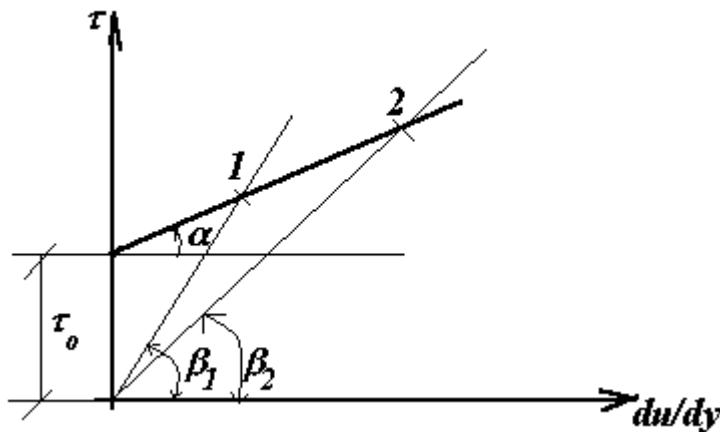


Рис .4. Иллюстрация к модели вязкопластичной жидкости

Для вязкопластичных жидкостей характерно наличие в неподвижном состоянии некой "кристаллической решетки" (которую создают твердые взвешенные частицы в растворе). Для того, чтобы привести в движение такую жидкость, необходимо разрушить "структуру", преодолеть начальное сопротивление движению (начальное напряжение сдвига τ_0). Подобными свойствами обладают, например, краски, некоторые нефти и многие жидкости, применяемые в буровой практике.

Вязкость при определенной скорости движения называется **эффективной** (обозначается η_s).

Поскольку вязкость есть отношение касательного напряжения τ к величине du/dy (следует из закона Ньютона (1), то для точки 1 (рис.4) $\eta_{s1} = \text{tg}\beta_1$, а для точки 2 - $\eta_{s2} = \text{tg}\beta_2$. Видно, что при увеличении скорости эффективная вязкость уменьшается ($\text{tg}\beta_2 < \text{tg}\beta_1$).

Величина η в формуле (3) называется *пластической* вязкостью. Такую вязкость имеет вязкопластическая жидкость в начальный момент движения ($\eta = \text{tg } \alpha$, рис. 4).

Для вязкопластичной жидкости приводится пластическая вязкость (коэффициенты η или ν) и начальное напряжение сдвига τ_0 . Эффективная вязкость η_e вычисляется по формулам, которые будут приведены ниже.

1.3. Вязкость газов

Поскольку у газов отсутствуют связи между молекулами, вязкость газа имеет совсем другой физический смысл.

Вспомним, что *вязкость - это то, что препятствует движению*. А целенаправленному потоку газа в одном направлении препятствует броуновское движение молекул, которое усиливается с увеличением температуры, что приводит к увеличению вязкости.

1.4. Расход . Закон сохранения массы

Количество вещества, проходящее через поперечное сечение потока, можно измерить в единицах массы, объёма или веса. Это количество зависит, очевидно, от скорости движения, величины сечения и времени наблюдения.

Согласно рис.5, через сечение $1-1$ за время t пройдет объём жидкости, равный объёму цилиндра $1-1-1'-1'$, то есть $V_1 = \vartheta_1 \cdot \omega_1 \cdot t$, и масса жидкости $m_1 = \rho_1 \cdot \vartheta_1 \cdot \omega_1 \cdot t$.

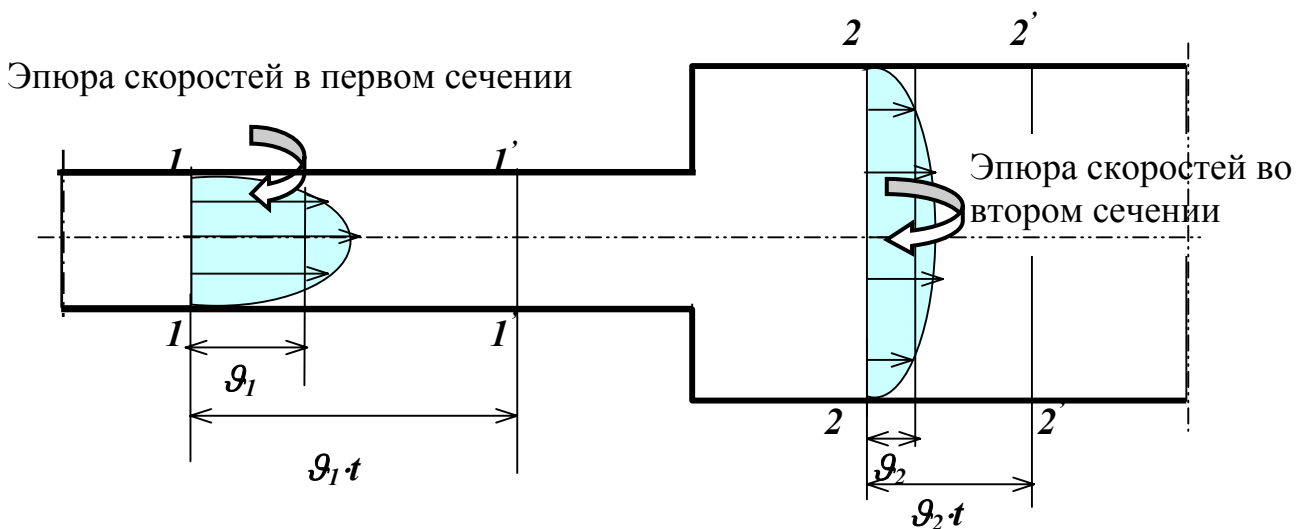


Рис. 5. Иллюстрация к закону сохранения массы

На пути движения от начального сечения к конечному форма поперечных сечений потока может меняться самым причудливым образом, однако то массовое количество жидкости, которое прошло за время t через любое сечение, должно остаться неизменным. Это следует из закона сохранения массы. Для рис. 5:

$$\rho_1 \cdot \vartheta_1 \cdot \omega_1 \cdot t = \rho_2 \cdot \vartheta_2 \cdot \omega_2 \cdot t \quad (4)$$

Поскольку время можно выбирать произвольно, удобно сравнивать количества жидкости, проходящие за единицу времени (1 с, 1 мин, 1 час и т.д.).

Количество жидкости, проходящее через сечение за единицу времени, называется расходом.

$$Q = \vartheta \cdot \omega \quad - \text{объемный расход} \quad (5)$$

$$Q_m = \rho \cdot \vartheta \cdot \omega = \rho \cdot Q = m/t \quad - \text{массовый расход} \quad (6)$$

$$Q_G = \rho \cdot g \cdot \vartheta \cdot \omega = \rho \cdot g \cdot Q = G/t \quad - \text{весовой расход} \quad (7)$$

Для жидкости плотность ρ можно считать постоянной величиной. Это следует из закона Гука.

Закон Гука определяет связь между напряжением и объемной деформацией при всестороннем сжатии жидкости:

$$\Delta p = - E \cdot \varepsilon$$

Здесь E - модуль объёмной упругости жидкости, $\varepsilon = \Delta V/V$ - относительное изменение объёма, V - первоначальный объём. Знак минус показывает, что при увеличении давления объём жидкости уменьшается.

Модуль упругости стали $E_{cm} = 2 \cdot 10^{11}$ Па, а модуль упругости воды $E = 2 \cdot 10^9$ Па. Вследствие высокого модуля упругости жидкости сжимаются незначительно. Так, при повышении давления на 10 МПа, изменение объёма равно:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{E} = \frac{10 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9} = 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5\%.$$

Поэтому чаще всего в гидравлических расчетах жидкость считают несжимаемой и плотность жидкости $\rho = m/V$ принимается величиной постоянной и не зависящей от давления:

Принимая $\rho = \text{const}$, вместо (4) получим:

$$\vartheta_1 \cdot \omega_1 = \vartheta_2 \cdot \omega_2 = \dots = Q = \text{const} \quad (8)$$

Уравнение (8) выражает закон постоянства объемного расхода по длине потока.

В случае, если по трубопроводу движется газ при изотермическом режиме, его плотность прямо пропорциональна давлению: $\rho = p/R \cdot T$ (следует из уравнения Менделеева-Клапейрона). Так как давление газа по длине трубопровода существенно изменяется, объёмный расход в сечениях также изменяется, а сохраняется только массовый расход.

$$\rho_1 \cdot \vartheta_1 \cdot \omega_1 = \rho_2 \cdot \vartheta_2 \cdot \omega_2 = \dots = Q_m = \text{const} \quad (8')$$

1.5. Режимы движения жидкости

Существуют **два режима** движения жидкости - **ламинарный и турбулентный**.

При **ламинарном** режиме **частицы** жидкости **перемещаются** по направлению движения **без поперечного перемешивания**. Это спокойное, **упорядоченное** течение, при котором отдельные струйки жидкости движутся параллельно друг другу.

При **турбулентном** режиме частицы жидкости перемещаются по случайным искривленным траекториям, при этом **имеют место поперечные пульсации скорости и давления** и гораздо бОльшие затраты энергии на перемещение жидкости. Это **беспорядочное, хаотическое** движение.

1.5.1. Критерий Рейнольдса и его физическая интерпретация

Режим движения жидкости в трубопроводе устанавливается расчетным путем по значению безразмерного числа - критерия Рейнольдса Re :¹

$$Re = \frac{\vartheta \cdot d \cdot \rho}{\eta}, \quad (9)$$

где ϑ - средняя скорость движения жидкости, d - диаметр трубопровода, ρ - плотность, а η - динамический коэффициент вязкости жидкости.

В потоке жидкости при её движении находятся во взаимодействии две силы - сила трения и сила инерции (рис. 6).

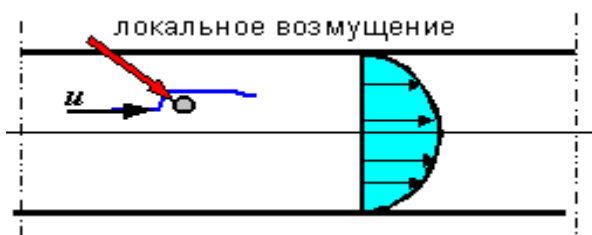


Рис. 6. К пояснению физического смысла числа Рейнольдса Re

Если траектория искривляется - появляется сила инерции.

Локальные (местные) возмущающие факторы - примеси, неровности поверхности и др. приводят к появлению сил инерции.

Вязкость приводит к неравномерной эпюре скоростей и появлению силы трения.

Число Re - мера отношения силы инерции к силе трения.

При малых скоростях движения (малых Re) силы инерции невелики и силы трения гасят возмущения (выравнивают траектории). Движение остается упорядоченным, то есть ламинарным. При увеличении скорости силы инерции растут, а силы трения практически не меняются (они зависят в основном от вязкости!). До некоторого предела силы трения ещё “справляются” с силами инерции, далее струйки распадаются на отдельные вихри и наступает турбулизация потока.

Критерий Рейнольдса зависит от вязкости. Если *жидкость вязкопластичная*, в формулу подставляется *эффективная вязкость η_e* :

$$Re^* = \frac{\vartheta \cdot d \cdot \rho}{\eta_e}. \quad (10)$$

Число Re^* называется *модифицированным* критерием Рейнольдса.

Внимание!

Индекс “*” - признак того, что движется вязкопластичная жидкость.

Число Рейнольдса, при котором *ламинарное*² движение сменяется *турбулентным*, называется *критическим* (обозначается $Re_{кр}$ или $Re^*_{кр}$).

¹ Рейнольдс Осборн (1842-1912) - английский физик и инженер. Экспериментально установил критерий режима движения жидкости - число Re .

² Для вязкопластичной жидкости при $Re^* < Re^*_{кр}$ имеет место не ламинарный, а структурный режим течения.

Турбулизация ускоряется и наступает раньше, если в потоке жидкости много локальных возмущающих факторов (например, частицы глины в глинистом растворе, или больше поверхность контакта со стенкой, где есть микронеровности).

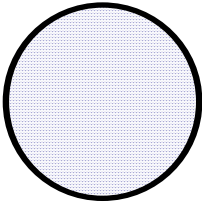
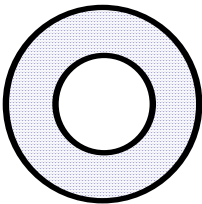
Вывод:

Турбулизация наступает раньше в вязкопластичной жидкости, чем в ньютоновской и для любой жидкости в кольцевом канале, чем в круглой трубе.

Критическое число Рейнольдса определяется экспериментально и приводится в справочной литературе.

Критические числа Рейнольдса

Таблица 1

| Жидкость | Ньютоновская | Вязкопластичная |
|---|--------------|-----------------|
| Форма сечения канала | $Re_{кр}$ | $Re_{кр}^*$ |
|  | 2300 | 2100 |
|  | 1600 | 1000 |

1.5.2. Определение режима движения жидкостей

При определении режима движения необходимо вычислить по известным параметрам расчетное число Рейнольдса и далее сравнить его с критическим значением для данного случая.

Если $Re < Re_{кр}$ -ламинарный режим движения;

Если $Re > Re_{кр}$ -турбулентный режим движения.

На практике жидкость движется в каналах произвольной формы, возникает вопрос, что же подставлять вместо диаметра d в формулу для числа Рейнольдса?

Для каналов с любой формой сечения потока вводится характерный линейный размер сечения -*гидравлический диаметр d_z* :

$$d_z = 4\omega / \Pi, \quad (11)$$

где ω -площадь сечения потока, занятого жидкостью (площадь *живого* сечения);

Π - *смоченный периметр* (часть периметра живого сечения, по которому поток

касается твердых стенок или длина контакта между жидкостью и твердой стенкой в сечении).

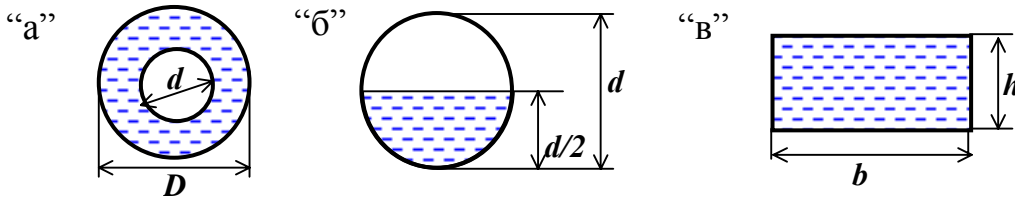


Рис. 7. Иллюстрация к определению гидравлического диаметра
Для сечений, изображенных на рис. 7, получим:

$$\text{“а”} \quad d_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot (\pi \cdot D + \pi \cdot d)} = D - d$$

$$\text{“б”} \quad d_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot 2}{8 \cdot \pi \cdot d} = d$$

$$\text{“в”} \quad d_2 = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)}$$

Обратите внимание!

Для схемы “б” длина контакта между жидкостью и газом не входит в смоченный периметр.

Итак, в самом общем случае число Рейнольдса определяется так:

$$\text{для ньютоновской жидкости} - \quad Re = \frac{\rho \cdot d_2 \cdot \nu}{\eta} \quad (12)$$

$$\text{для вязкопластичной жидкости} - \quad Re^* = \frac{\rho \cdot d_2 \cdot \nu}{\eta_s} \quad (13)$$

Эффективная вязкость при *движении в трубе*

$$\eta_s = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{6} Bi\right) = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\tau_o \cdot d}{\eta \cdot \nu}\right), \quad (14)$$

где $Bi = \frac{\tau_o \cdot d}{\eta \cdot \nu}$ - критерий Бингама, а η , τ_o - пластическая вязкость и начальное напряжение сдвига- справочные величины.

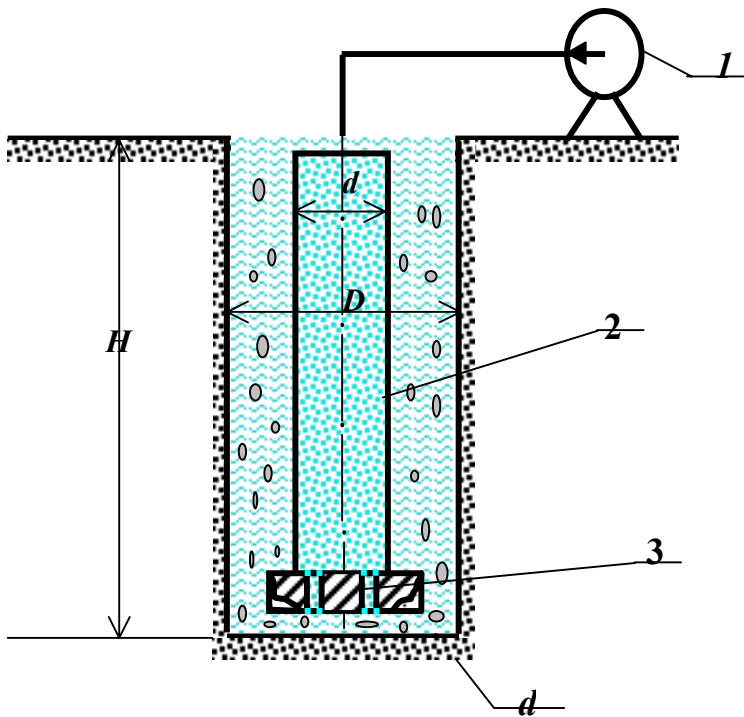
Эффективная вязкость при *движении в кольцевом канале* (рис. 7”а)

$$\eta_s = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{8} Bi\right) = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \frac{\tau_o \cdot (D - d)}{\eta \cdot \nu}\right), \quad (15)$$

где $Bi = \frac{\tau_o \cdot (D - d)}{\eta \cdot \nu}$ - критерий Бингама для кольцевого канала.

1.5.3. Задача

Определить режим движения жидкости в буровой трубе и в затрубном пространстве скважины. **Задачу решить в общем виде**, то есть составить алгоритм³ решения.



На рисунке изображена схема процесса промывки скважины.

Поршневой насос 1 нагнетает промывочную жидкость в **буровую трубу 2**, далее жидкость проходит через **отверстия (насадки) 3 в долоте**, подхватывает **частицы выбуренной породы** и выносит их на поверхность через затрубное пространство скважины.

Дано: Q - подача насоса, D - диаметр скважины, d - диаметр буровой трубы, ρ , η , τ_o - соответственно плотность, пластическая вязкость и начальное напряжение сдвига бурового раствора (промывочной жидкости).

Рис.8. Схема к задаче.

Решение.

1. Определяем расчетное значение числа Рейнольдса при движении промывочной (вязкопластичной!) жидкости в буровой трубе, используя формулы (13) и (14):

$$Re_1^* = \frac{\vartheta \cdot d_1 \cdot \rho}{\eta_s}; \quad \vartheta_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}; \quad \eta_s = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{6} Bi\right) = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\tau_o \cdot d}{\eta \cdot \vartheta}\right);$$

$$Re_1^* = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot d \cdot \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\tau_o \cdot \pi \cdot d^3}{\eta \cdot 4 \cdot Q}\right)};$$

Критическое число $Re_{1\text{кр}}^*$ в данном случае равно 2100 (таблица 1).

Если $Re_1^* < 2100$ - имеет место структурный режим движения, если $Re_1^* > 2100$ - турбулентный режим движения.

³ **Алгоритм** - конечный набор правил, позволяющих чисто механически решать конкретную задачу из некоторого класса однотипных задач. При этом подразумевается, что исходные данные могут изменяться в определенных пределах.

2. Определяем расчетное значение числа Рейнольдса при движении промывочной (вязкопластичной!) жидкости в затрубном пространстве, используя формулы (13) и (15). Сечение потока представляет собой кольцо (рис.7"а"). Гидравлический диаметр равен $(D - d)$.

$$Re_2^* = \frac{\vartheta_2 \cdot d_2 \cdot \rho}{\eta_s}; \quad \vartheta_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}; \quad d_2 = D - d;$$

$$\eta_s = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{8} Bi\right) = \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \frac{\tau_o \cdot (D - d)}{\eta \cdot \vartheta_2}\right);$$

$$Re_2^* = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot (D + d) \cdot \eta \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \frac{\tau_o \cdot \pi \cdot (D - d) \cdot (D^2 - d^2)}{\eta \cdot 4 \cdot Q}\right)};$$

Критическое число $Re_{2\text{кр}}^*$ в данном случае равно 1000 (Таблица 1). Если $Re_2^* < 1000$ - имеет место структурный режим движения, если $Re_2^* > 1000$ - турбулентный режим.

Внимание!

Площадь кольца равна $\pi \cdot (D^2 - d^2)/4$ (площадь большого круга минус площадь малого круга), а не $\pi \cdot (D - d)^2/4$. Это распространенная студенческая ошибка.



2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводится на виртуальном лабораторном стенде (Рис. 9).

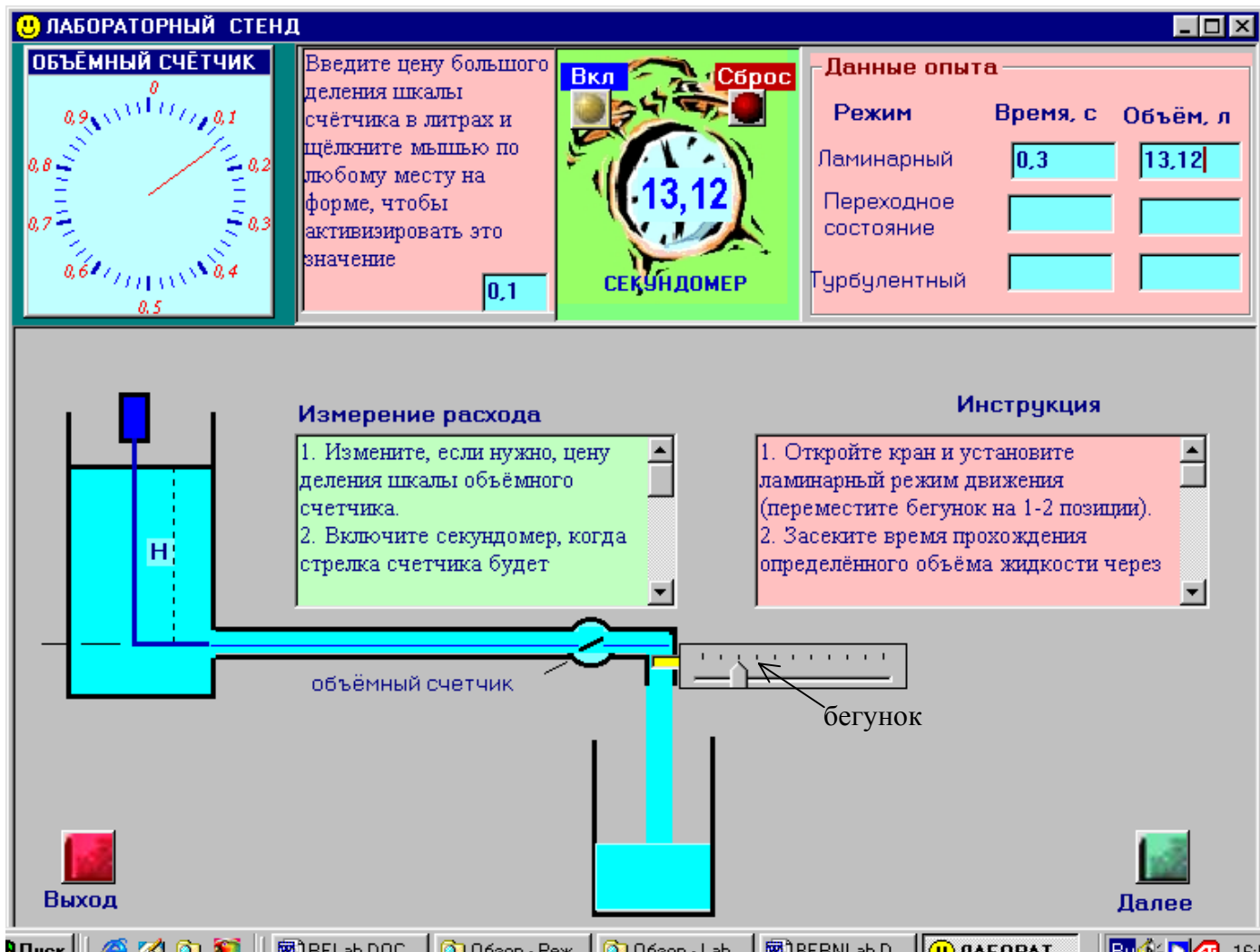
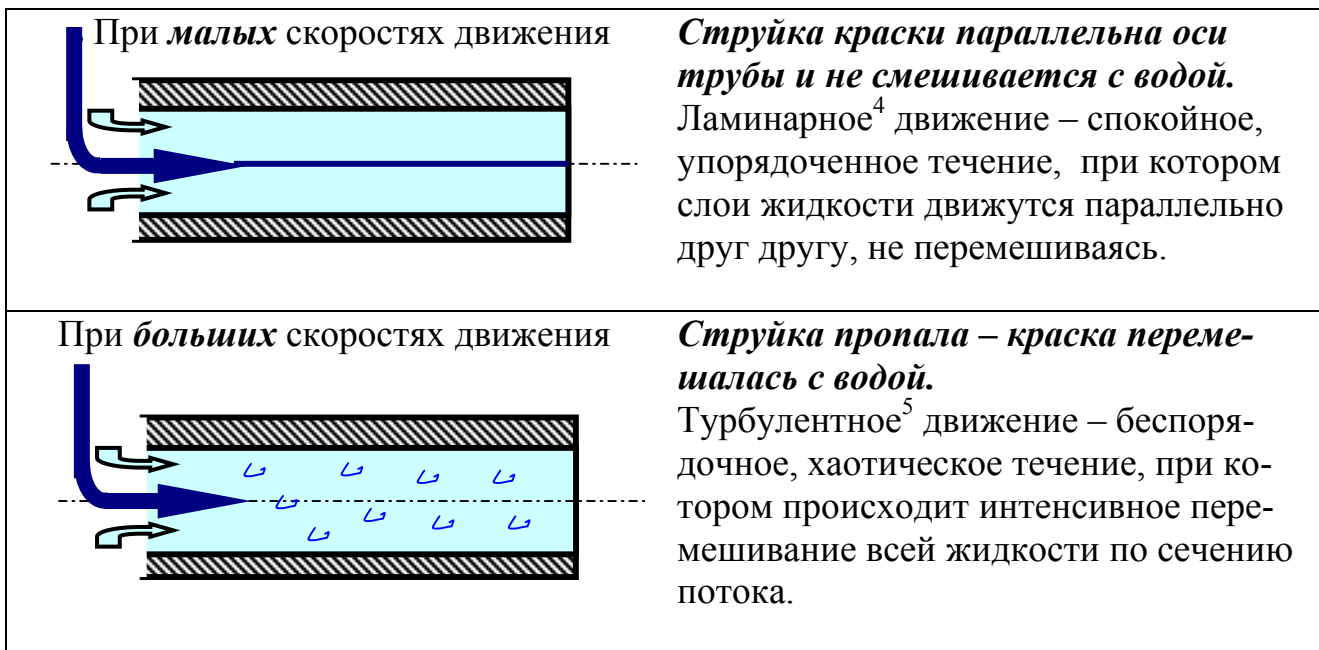


Рис. 9. Лабораторный стенд

Вода из резервуара поступает в прозрачную трубу. Для регулирования скорости движения жидкости на трубе установлен кран, который открывается с помощью бегунка. В центр водяного потока в трубе поступает струйка краски. Для определения расхода жидкости на стенде имеется объёмный счетчик и секундомер.

В процессе проведения эксперимента ведется наблюдение за поведением струйки краски при разных скоростях движения жидкости. Скорость движения жидкости регулируется с помощью крана.



2.1 Цель эксперимента

- Установить визуально ламинарный режим движения, переходное состояние и турбулентный режим;
- Измерить для каждого из трех опытов расход жидкости;
- Вычислить для каждого опыта число Рейнольдса и сравнить визуальную характеристику режима с расчетной.

2.2. Порядок проведения эксперимента

Представлен в инструкции на лабораторном стенде и ниже на соответствующем интерфейсе.

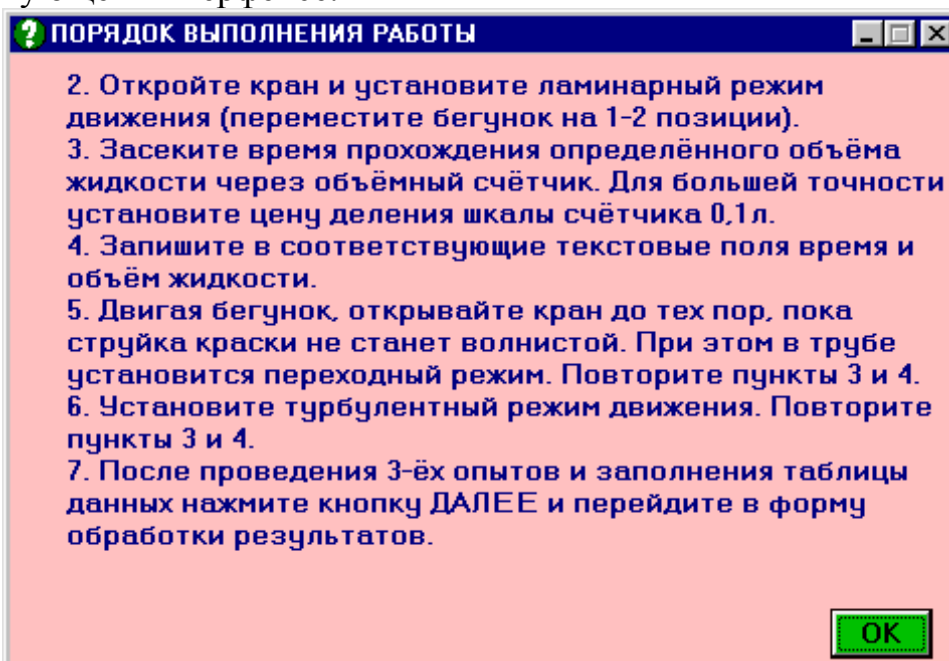


Рис. 11. Порядок выполнения работы

⁴ Ламинарное – от английского слова *lamina*, что означает слой.

⁵ Турбулентное – от англ. слова *turbulentus*, что означает беспорядочный, хаотический..

2.3. Обработка результатов эксперимента и подготовка отчета

После проведения эксперимента и нажатия кнопки «Далее» Вы попадаете на форму «Расчетные формулы», Рис. 12.

Рис. 12. Ввод расчетных формул

При вводе расчетных формул используются обозначения, указанные в инструкции (это вызвано необходимостью использовать латинский алфавит).

После ввода расчетных формул и нажатия кнопки «Excel» программа создает файл отчета по лабораторной работе под именем студента и открывает приложение **Microsoft Excel**.

| Исходные данные | | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------|---|------------|------------|--------------|
| Опыт | | | | |
| 4 | Визуальная характеристика режима | ламинарный | переходный | турбулентный |
| 5 | Диаметр трубопровода, мм | 25 | 25,00 | 25,00 |
| 6 | Вязкость жидкости, см ² /с | 0,0080 | 0,0080 | 0,0080 |
| 7 | Время, с | 33,00 | 33,00 | 33,00 |
| 8 | Объем по счётчику, л | 33,00 | 33,00 | 33,00 |
| 10 Результаты расчета | | | | |
| 11 | Расход жидкости, л/с | | | |
| 12 | Средняя скорость, м/с | | | |
| 13 | Расчетное значение критерия Рейнольдса (Re) | | | |
| 14 | Критическое значение критерия Рейнольдса (ReKr) | | | |
| 15 | Расчетная характеристика режима | | | |

Рис. 13. Отчет по лабораторной работе

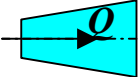
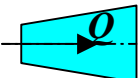
На Рис.13 показан файл отчета в начальном состоянии. В него скопированы исходные и опытные данные. Необходимо ввести расчетные формулы в ячейки B11-B14. После ввода формулы необходимо скопировать её по горизонтали на все ячейки диапазона (на все опыты). Подробнее о работе в **Microsoft Excel** можно узнать в соответствующих руководствах.



3. ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- Заполнить таблицу.
- Ответить на теоретические вопросы и решить задачу (по указанию преподавателя).

3.1. Заполнить таблицу

| | | |
|--|---|--|
| 1. | Формула для определения числа Re для круглой трубы через среднюю скорость. Жидкость ньютоновская. | |
| 2. | Формула для определения числа Re для круглой трубы через объёмный расход жидкости. Жидкость ньютоновская. | |
| 3. | Формула для определения числа Re для канала любой геометрии через среднюю скорость. Жидкость ньютоновская. | |
| 4. | Формула для определения числа Re для канала любой геометрии через массовый расход. Жидкость ньютоновская. | |
| 5. | Формула для определения числа Re^* для круглого канала через среднюю скорость. Жидкость неньютоновская (вязкопластичная). | |
| 6. | Формула для определения числа Re^* для кольцевого канала через объёмный расход. Жидкость неньютоновская (вязкопластичная). | |
| 7. |  <p>Что произойдет с объёмным расходом жидкости при увеличении сечения канала?</p> | |
| 7. |  <p>Что произойдет со средней скоростью движения жидкости при увеличении сечения канала?</p> | |
| Закончите мысль: | | |
| <p>Расчетное число Re – это</p> <p>Оно зависит от</p> | | |
| <p>Критическое число $Re_{кр}$ – это</p> <p>Оно зависит от</p> | | |

Ньютоновские жидкости - это

Примеры:

Неньютоновские жидкости - это

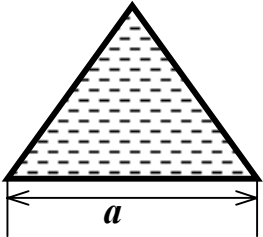
Примеры:

3.2. Контрольные вопросы

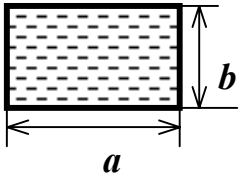
- 1). Что такое **вязкость** жидкости?
- 2). Почему с увеличением температуры вязкость жидкостей уменьшается, а газов возрастает?
- 3). Какими параметрами характеризуется вязкость? Какова связь между ними?
- 4). Какие жидкости называются **ньютоновскими**? Поясните параметры, характеризующие их физические свойства: плотность ρ , коэффициент вязкости η (или ν), модуль упругости E .
- 5). Какие жидкости называются **неньютоновскими**? Поясните параметры, характеризующие физические свойства вязкопластичной жидкости: плотность ρ , коэффициент пластической вязкости η (или ν), модуль упругости E , начальное напряжение сдвига τ_0 .
- 6). Как определить режим движения **ньютоновской** жидкости при её движении в **круглой трубе**?
- 7). Как определить режим движения **ньютоновской** жидкости при её движении в **кольцевом канале**?
- 8). Как определить режим движения **неньютоновской** жидкости при её движении в **круглой трубе**?
- 9). Как определить режим движения **неньютоновской** жидкости при её движении в **кольцевом канале**?
- 10). Как определить режим движения жидкости при её движении в канале **любой геометрии**?
- 11). Почему при увеличении температуры жидкости число **Re** тоже увеличивается?
- 12). Что такое **расход** жидкости? Какие виды расходов Вы знаете?
- 13). Почему при движении жидкости в любом сечении потока **объёмный** расход остается постоянным, а при движении газа он изменяется?
- 14). Почему при движении **жидкости** в трубопроводе постоянного диаметра средняя **скорость постоянна в любом сечении**, а при движении **газа** она **увеличивается в направлении движения**?

3.3. Задачи к защите лабораторной работы

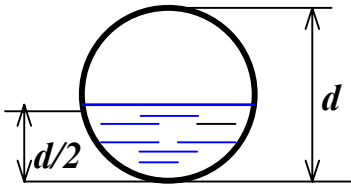
Задача 1

| | |
|---|---|
|  | <p>Определите число Re в канале, имеющем форму равностороннего треугольника, если дано: ρ, a, η - динамический коэффициент вязкости, объёмный расход Q. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|---|

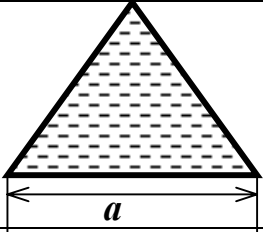
Задача 2

| | |
|---|--|
|  | <p>Определите число Re в канале прямоугольной формы поперечного сечения, если дано: ρ, a, b, η - динамический коэффициент вязкости, весовой расход Q_G. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|--|

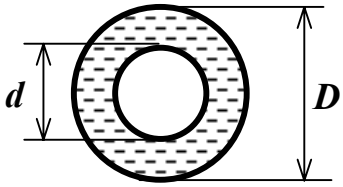
Задача 3

| | |
|---|---|
|  | <p>Определите число Re в круглом канале, наполовину заполненном жидкостью, если дано: ρ, d, η - динамический коэффициент вязкости, массовый расход Q_m. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|---|

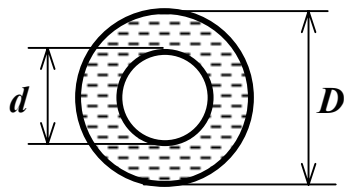
Задача 4

| | |
|---|--|
|  | <p>Определите число Re в канале, имеющем форму равностороннего треугольника, если дано: ρ, a, η - динамический коэффициент вязкости, весовой расход Q_G. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|--|

Задача 5

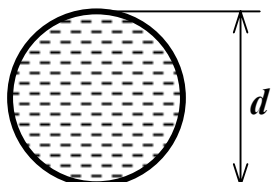
| | |
|---|---|
|  | <p>Определите число Re в кольцевом канале, если дано: ρ, d, D, η - динамический коэффициент вязкости, массовый расход Q_m. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|---|

Задача 6



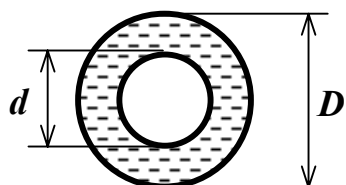
Определите число Re^* в кольцевом канале, если дано: ρ , d , D , η -пластическая вязкость, τ_0 – начальное напряжение сдвига, массовый расход Q_m . Жидкость неньютоновская - вязкопластичная.

Задача 7



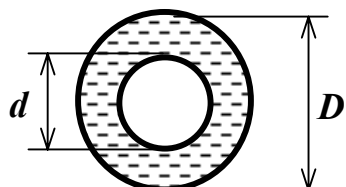
Определите число Re^* в круглом канале, если дано: ρ , d , η -пластическая вязкость, τ_0 – начальное напряжение сдвига, объёмный расход Q . Жидкость неньютоновская - вязкопластичная.

Задача 8



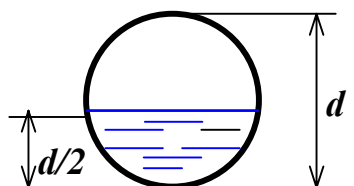
Определите максимальную скорость и максимальный объёмный расход, при котором в кольцевом канале ламинарный режим сменяется турбулентным. Дано: ρ , d , D , η -пластическая вязкость, τ_0 – начальное напряжение сдвига. Жидкость неньютоновская - вязкопластичная.

Задача 9



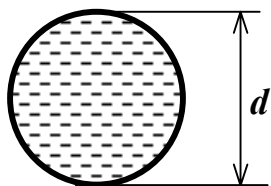
Определите максимальную скорость и максимальный массовый расход, при котором в кольцевом канале ламинарный режим сменяется турбулентным. Дано: ρ , d , D , η -динамический коэффициент вязкости. Жидкость ньютоновская.

Задача 10



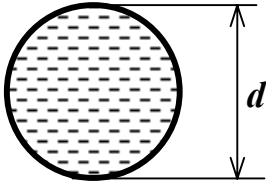
Определите максимальную скорость и максимальный массовый расход, при котором ламинарный режим сменяется турбулентным. Канал – круглый, наполовину заполненный жидкостью. Дано: ρ , d , η -динамический коэффициент вязкости. Жидкость ньютоновская.

Задача 11

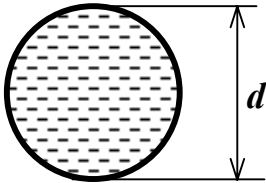


Определите максимальную скорость и максимальный массовый расход, при котором ламинарный режим сменяется турбулентным. Канал – круглый. Дано: ρ , d , η -динамический коэффициент вязкости. Жидкость ньютоновская.

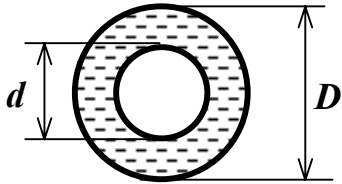
Задача 12

| | |
|---|---|
|  | <p>Определите максимальную скорость и максимальный объёмный расход, при котором круглом канале ламинарный режим сменяется турбулентным. Дано: ρ, d, η - пластическая вязкость, τ_0 - начальное напряжение сдвига. Жидкость неньютоновская - вязкопластичная.</p> |
|---|---|

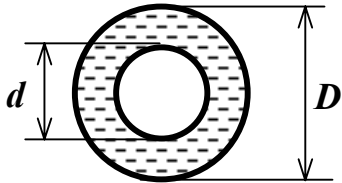
Задача 13

| | |
|---|---|
|  | <p>Определите температуру воды, при которой ламинарный режим сменяется турбулентным. Канал - круглый. Дано: ρ, d, Q_m - массовый расход. Жидкость ньютоновская.</p> |
|---|---|

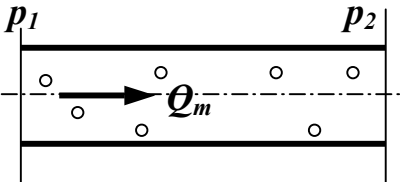
Задача 14

| | |
|--|--|
|  | <p>Определите температуру воды, при которой ламинарный режим сменяется турбулентным. Канал кольцевого сечения. Дано: ρ, d, D, Q_m - массовый расход. Жидкость ньютоновская.</p> |
|--|--|

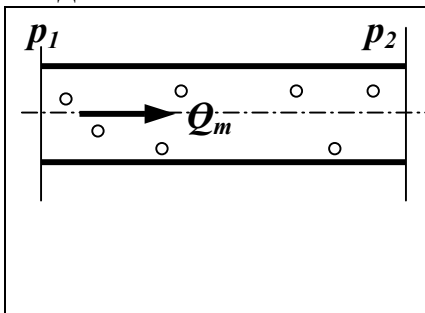
Задача 15

| | |
|---|--|
|  | <p>Определите температуру нефти, при которой ламинарный режим сменяется турбулентным. Канал кольцевого сечения. Дано: ρ, d, D, Q - объёмный расход, τ_0 - начальное напряжение сдвига. Жидкость неньютоновская - вязкопластичная.</p> |
|---|--|

Задача 16

| | |
|---|---|
|  | <p>По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Доказать, что число $Re = \text{const}$ в любом сечении, а средняя скорость в конечном сечении больше, чем в начальном.</p> |
|---|---|

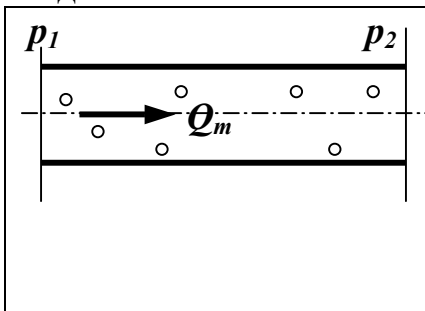
Задача 17



По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Дано: давления в начале и конце участка p_1 и p_2 , абсолютная температура T , газовая постоянная R , скорость в начальном сечении \mathcal{V}_1 , диаметр трубы d , динамический коэффициент вязкости η .

Определить: массовый расход Q_m , число Re и скорость в конечном сечении \mathcal{V}_2 .

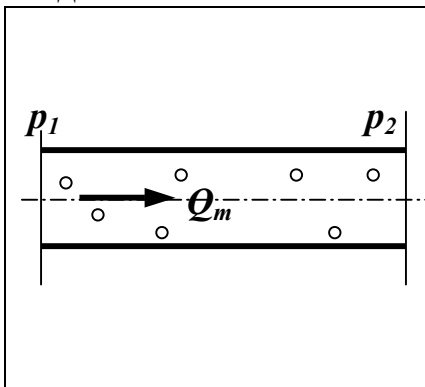
Задача 18



По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Дано: давления в начале и конце участка p_1 и p_2 , абсолютная температура T , газовая постоянная R , скорость в конечном сечении \mathcal{V}_2 , диаметр трубы d , динамический коэффициент вязкости η .

Определить: массовый расход Q_m , число Re и скорость в начальном сечении \mathcal{V}_1 .

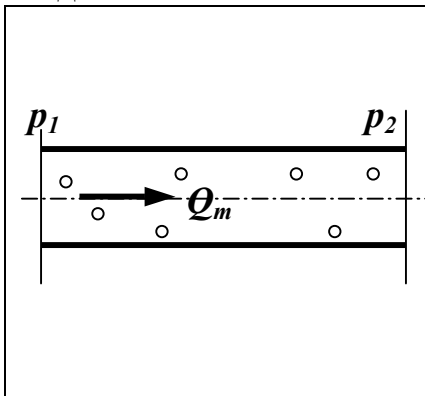
Задача 19



По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Дано: давления в начале и конце участка p_1 и p_2 , абсолютная температура T , газовая постоянная R , скорость в начальном сечении \mathcal{V}_1 , диаметр трубы d , массовый расход Q_m .

Определить: скорость в конечном сечении \mathcal{V}_2 и динамический коэффициент вязкости η , при котором ламинарный режим сменяется турбулентным.

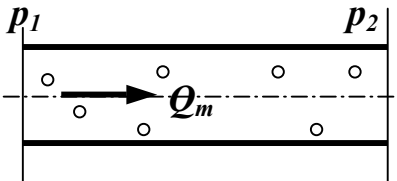
Задача 20



По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Дано: давления в начале и конце участка p_1 и p_2 , абсолютная температура T , газовая постоянная R , диаметр трубы d , динамический коэффициент вязкости η .

Определить: скорости - в начальном сечении \mathcal{V}_1 и в конечном сечении \mathcal{V}_2 и массовый расход Q_m , при котором ламинарный режим сменяется турбулентным.

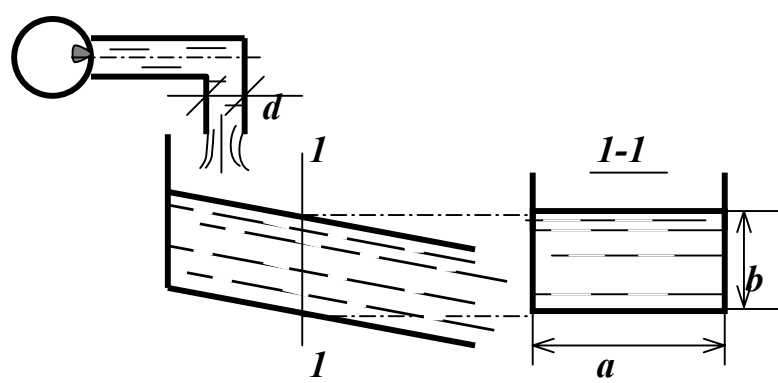
Задача 21

| | |
|---|--|
|  | <p>По трубопроводу движется газ в изотермическом режиме. Дано: абсолютная температура T, газовая постоянная R, диаметр трубы d, динамический коэффициент вязкости η, скорости - в начальном сечении \mathcal{Q}_1 и в конечном сечении \mathcal{Q}_2.</p> <p>Определить: давления в начале и конце участка p_1 и p_2 и массовый расход Q_m, при котором ламинарный режим сменяется турбулентным.</p> |
|---|--|

Задача 22

| | |
|--|---|
|  <p>Подача насоса – количество жидкости, которое проходит через насос за единицу времени. Подача насоса равна расходу жидкости.</p> | <p>Жидкость поступает из трубопровода диаметром d в открытый прямоугольный канал, где движется под действием силы тяжести. Движение установившееся. Дано: ρ, η, d, a, b, \mathcal{Q}_{mp} – скорость движения в трубе. Определить число Re в трубе и в канале, а также подачу насоса.</p> |
|--|---|

Задача 23

| | |
|---|---|
|  <p>Подача насоса – количество жидкости, которое проходит через насос за единицу времени. Подача насоса равна расходу жидкости.</p> | <p>Жидкость поступает из трубопровода диаметром d в открытый прямоугольный канал, где движется под действием силы тяжести. Движение установившееся. Дано: ρ, η, d, a, b, Q – объёмная подача насоса. Определить число Re в трубе и в канале, а также \mathcal{Q}_{mp} – скорость движения в трубе.</p> |
|---|---|