

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»**

Кафедра энергоресурсосберегающих процессов в химической  
и нефтегазовой технологиях

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Методические указания к лабораторной работе № 11 по дисциплинам  
**«Процессы и аппараты химической технологии»,**  
**«Механика жидкости и газа», «Гидрогазодинамика», «Гидрогазомеханика»**  
для обучающихся направлений подготовки  
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,  
18.03.01 Химическая технология,  
20.03.01 Техносферная безопасность  
всех форм обучения

Составители Ю. О. Афанасьев  
Н. В. Тиунова  
Н. Н. Изотов  
А. А. Андрюшков

Рассмотрены и утверждены  
на заседании кафедры  
Протокол № 2 от 09.10.2018  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления подготовки 18.03.02  
Протокол № 2 от 09.10.2018  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2018

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – изучение структуры потока вязкой жидкости при ламинарном и турбулентном режимах течения.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Движение вязкой жидкости (газа) может существовать при двух принципиально различных режимах течения. Интенсивность большинства физико-химических процессов, протекающих в различных аппаратах, зависит от режима течения вещества в устройствах. Изучение характера течения среды позволяет правильно рассчитать процессы гидродинамики, тепло- и массообмена, а следовательно, создать наиболее рациональные конструкции аппаратов.

При малой скорости течения частицы жидкости движутся по параллельным траекториям. Если представить поток разделенным на ряд элементарных струек, то отдельные струйки движутся параллельно друг другу, не перемешиваясь. Этот режим называется струйчатым или ламинарным. Крайним случаем ламинарного режима являются ползущие течения. Они характеризуются исключительно малой скоростью движения частиц жидкости. Представление о таком движении дают падения легких шариков в массе глицерина или фильтрация жидкости через слой мелкозернистой среды из твердых частиц. При осаждении шарика жидкость, благодаря влиянию вязкости, подвергается заметной «деформации», распространяющейся на значительные расстояния во всех направлениях от тела. Ползущие движения такого типа часто называют деформационными течениями. Для установившегося (стационарного) ламинарного потока скорость каждой частицы жидкости постоянна во времени. Распределение скоростей по поперечному сечению трубопровода определяется по параболическому закону от нуля на стенке трубопровода до максимального значения на оси, причем средняя скорость потока равна половине максимальной.

Увеличение скорости течения приводит к появлению волнообразного движения частиц жидкости. Эти волны неустойчивы и стремятся расти по амплитуде (рис. 1).

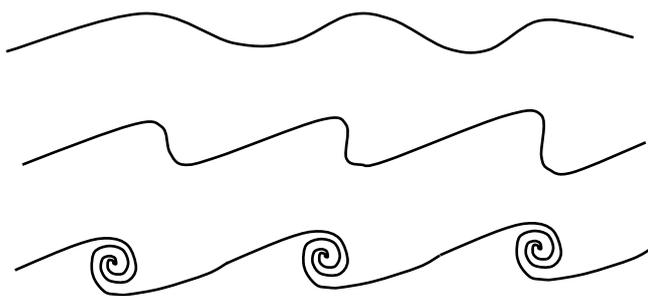


Рис. 1. Возникновение турбулентного течения

Дальнейшее развитие волнообразных возмущений приводит к их «свертыванию» и последующему распаду волнообразной поверхности на отдельные вихри. Вихри способствуют интенсивному перемешиванию жидкости в поперечном направлении. Этот режим течения называется турбулентным. При турбулентном движении из-за хаотичного, пульсирующего движения частиц происходит выравнивание скоростей в основной массе потока и их распределение по сечению трубы характеризуется кривой, имеющей более широкую вершину, по сравнению с параболой (рис. 2). Так как в турбулентном потоке имеют место пульсации скорости, то профиль скоростей выражает распределение не истинных, а осредненных во времени скоростей. Средняя скорость потока при турбулентном движении равна 0,8–0,9 от максимальной.

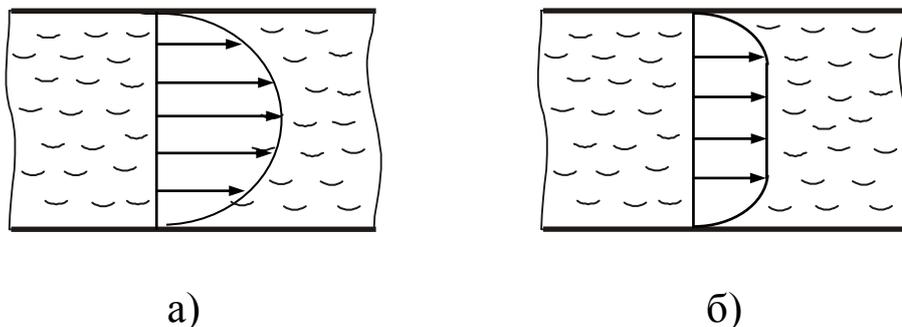


Рис. 2. Распределение скоростей при различных режимах движения:  
 а – ламинарный поток;  
 б – турбулентный поток

Из опытов известно, что жидкость не скользит по твердой стенке, а прилипает к ней и, следовательно, скорость жидкости на стенке равна нулю. Поэтому у стенки существует тонкий слой, в котором жидкость

движется ламинарно. Этот слой называется вязким подслоем. Следовательно, турбулентное течение не существует в чистом виде, а всегда сопровождается ламинарным. В центре потока, на оси трубопровода, можно выделить область, в которой скорость одинакова вследствие интенсивного турбулентного перемешивания. Эту область течения принято называть ядром потока. В ядре потока протекает основная часть жидкости (газа), и здесь можно пренебречь вязким трением. По мере приближения к стенке трубы скорость жидкости снижается. Эта зона (вместе с вязким подслоем) называется гидродинамическим пограничным слоем. Основные гидродинамические потери, возникающие при течении вязкой жидкости, зависят от условий движения жидкости в пограничном слое. Этот слой еще называют слоем трения.

Как показали опыты, характер движения жидкости (газа) зависит не только от средней скорости, но и от геометрических размеров канала (эквивалентного диаметра) и физических свойств среды. Влияние этих параметров на режим движения определяется величиной критерия Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – средняя скорость потока, м/с;  $d$  – эквивалентный диаметр, м;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $\nu = \mu/\rho$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Число Рейнольдса – это критерий подобия, который показывает соотношение сил инерции и сил внутреннего трения в движущемся потоке. Отсюда следует, что турбулентное течение свойственно потокам, обладающим развитыми силами инерции, а ламинарное – характерно для потоков, в которых преобладают силы внутреннего трения.

Экспериментальные исследования показали, что для ламинарного режима численное значение критерия Рейнольдса всегда меньше, а для турбулентного – всегда больше некоторого определенного критического значения. Например, для прямых гладких труб критическое значение числа Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{крит}} = 2320$ .

Необходимо отметить, что приведенное критическое значение является в известной степени условным, т. к. трудно обнаружить резкий переход от ламинарного режима к турбулентному. В действительности обычно наблюдается так называемая «переходная» область исчезновения ламинарного и установления турбулентного состояния потока. Критические значения критерия Рейнольдса, полученные опытным пу-

тем, находятся в пределах 2320–10000. При значениях  $Re$  более 10000 режим течения становится развитым (устойчивым) турбулентным.

В основу аналитического исследования положены два важнейших принципа. Один из них опирается на различие между ламинарными и турбулентными течениями – двумя возможными режимами движения, другой – на различие между ползущими течениями и течениями с пограничным слоем, являющимися крайними случаями проявления эффекта вязкости.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На лабораторном стенде проводятся опыты по определению режимов течения вязкой жидкости в зависимости от скорости потока и температуры жидкости. Полученные данные сравниваются с результатами известных экспериментов по определению критического числа  $Re$  для течения по гладким горизонтальным трубам.

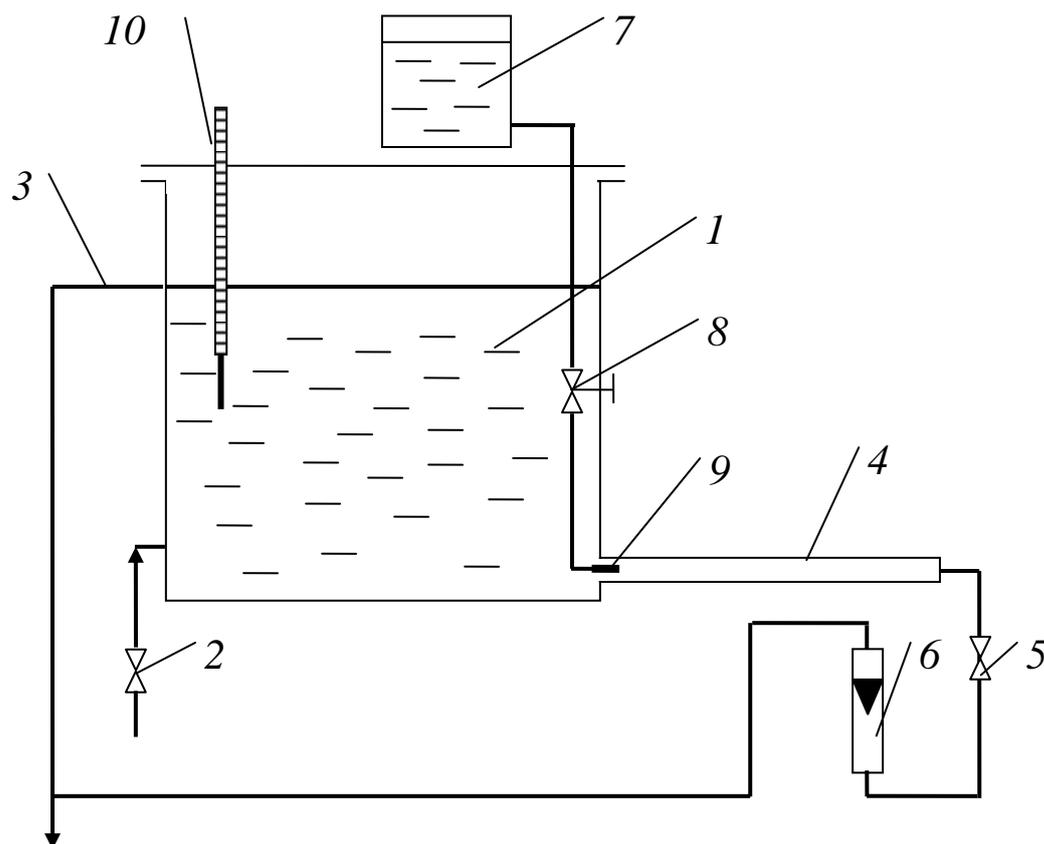


Рис. 3. Схема лабораторной установки для определения режимов движения жидкости: 1 – бак постоянного уровня; 2, 5, 8 – регулирующие вентили; 3 – переливная труба; 4 – опытный участок; 6 – ротаметр; 7 – сосуд с подкрашенной жидкостью; 9 – трубка с насадком; 10 – термометр



Перед началом работы открывают вентиль 2 и заполняют водой бак постоянного уровня 1 до уровня переливной трубы 3, затем вентилем 2 регулируют подачу воды таким образом, чтобы уровень ее оставался постоянным.

Работу производят с достаточно малых расходов для установления ламинарного режима и, увеличивая постепенно скорость движения воды в опытном участке 4, наблюдают за изменениями, происходящими со струйкой при разных режимах течения.

После наглядного изучения поведения струйки индикатора приступают к измерению величин, необходимых для определения числа Рейнольдса, начиная с ламинарного режима и заканчивая турбулентным.

Вентилем 5 устанавливают небольшой расход воды через опытный участок 4. Для пуска струйки индикатора постепенно открывают вентиль 8. Регулируя подачу индикатора, добиваются четкого очертания подкрашенной струйки. Наличие резко выделяющейся, четко очерченной струи индикатора указывает на то, что в трубе имеет место ламинарный режим течения. Записывают в таблицу показания ротаметра 6 и температуру воды по термометру 10.

Затем, открывая вентиль 5, увеличивают скорость воды в опытном участке 4, вследствие чего ламинарный режим переходит в турбулентный. При этом вентилем 8 регулируют расход подкрашенной жидкости, добиваясь ее четкого очертания. Проводят 6–8 замеров для различных скоростей жидкости, заканчивая эксперимент при полностью открытом вентиле 6.

### 3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Расход воды определяют по тарировочному графику ротаметра. Среднюю скорость воды в трубе рассчитывают по уравнению:

$$\omega = \frac{V}{0,785d^2}, \quad (2)$$

где  $V$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $d$  – внутренний диаметр стеклянной трубы, м ( $d = 22$  мм).

Число Рейнольдса рассчитывают по формуле (1). Результаты наблюдений, опытные и расчетные данные заносят в журнал наблюдений.

Делают выводы по работе, которые должны содержать сравнение результатов расчета и эксперимента, а также анализ причин их расхождения.

#### 4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед работой все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности.

2. Все виды работ студенты выполняют только по указанию и под руководством преподавателя и лаборанта.

3. Во время выполнения работы необходимо следить за тем, чтобы уровень воды в напорном баке не поднимался выше переливной трубы.

##### 4. ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

– оставлять без присмотра находящийся в работе лабораторный стенд;

– производить работы на оборудовании, не относящемся к данной работе.

#### 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

- титульный лист установленной формы;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- таблицу измеренных величин;
- обработку результатов;
- выводы по работе.

Чертежи, схемы и таблицы следует оформлять в соответствии со стандартами.

#### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель работы.

2. Какое течение называют ламинарным, ползущим, деформационным?

3. Закон изменения скорости потока в поперечном сечении трубопровода при ламинарном течении.

4. Соотношение между средней и максимальной скоростями в ламинарном и турбулентном потоках.

5. Какова структура турбулентного потока?

6. Физический смысл и критические значения критерия Рейнольдса для прямых труб и змеевиков.

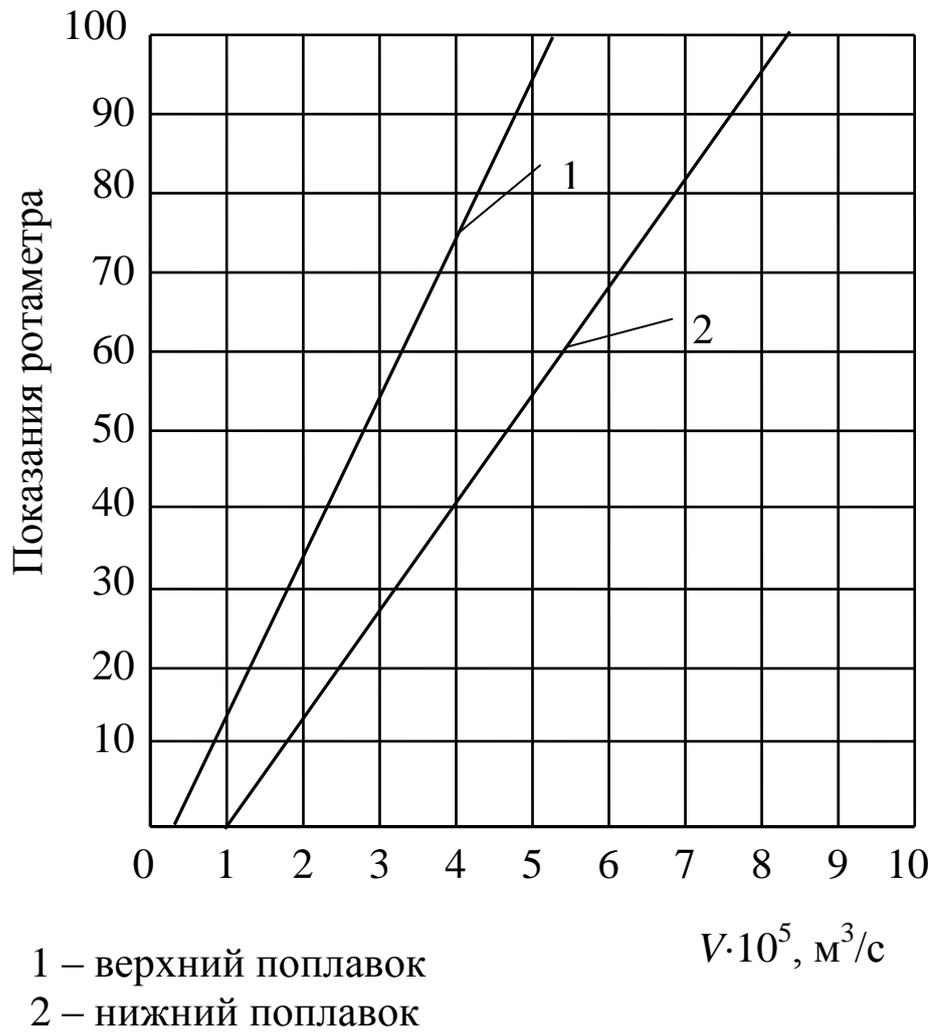
7. Что такое эквивалентный диаметр и гидравлический радиус?

8. Какая скорость входит в критерий Рейнольдса?

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: учебное пособие [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2008. – 608 с. – Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=98347](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=98347)
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – 11-е изд., перераб. – Москва: ООО ТИД «Альянс», 2014. – 753 с.
3. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.
4. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейн. – Москва: Логос; Высш. шк., 2002. Кн. 1. – 912 с.
5. Афанасьев, Ю. О. Газомеханика: учебное пособие / Ю. О. Афанасьев, Н. В. Тиунова; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2009. – 225 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Зависимость расхода воды от показаний ротаметра

Составители  
Афанасьев Юрий Олегович  
Тиунова Наталья Владимировна  
Изотов Николай Николаевич  
Андрюшков Алексей Анатольевич

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Методические указания к лабораторной работе № 11 по дисциплинам  
**«Процессы и аппараты химической технологии»,**  
**«Механика жидкости и газа», «Гидрогазодинамика», «Гидрогазомеханика»**  
для обучающихся направлений подготовки  
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,  
18.03.01 Химическая технология,  
20.03.01 Техносферная безопасность  
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Рецензент Михайлов Геннадий Сергеевич

Подписано в печать 06.11.2018. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч-изд. л. 0,5.

Тираж 35 экз. Заказ .

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Бедного, 4а.