



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРАЦИИ

*Методические указания
для выполнения лабораторной работы
по дисциплине «Механика жидкости и газа»*

Минск
БНТУ
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРАЦИИ

Методические указания
для выполнения лабораторной работы
по дисциплине «Механика жидкости и газа»
для студентов специальностей
1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью»,
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций»

Минск
БНТУ
2015

УДК 532.525.3
ББК 30.123я7
О-62

Составители:

Ю. П. Лебян, М. К. Щербакова

Рецензенты:

Ю. А. Гурвич, В. В. Ивашечкин

В методических указаниях излагаются теоретический материал по струйной аэрации и методика исследования незатопленной струи.

Пособие предназначено для студентов специальностей 1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью», 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», 1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций», изучающих курс «Механика жидкости и газа».

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

Цель работы

1. Опытное определение коэффициента аэрации незатопленных струй для форсунок различного размера и конфигурации.
2. Построение по опытным данным графиков зависимости коэффициента аэрации от расхода воды, скорости на выходе из форсунок, числа Рейнольдса и формы струи.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под **аэрацией жидкости** понимают насыщение ее в большей или меньшей мере пузырьками газа.

С явлением насыщения жидкости пузырьками газа приходится сталкиваться также при проведении целого ряда технологических процессов в промышленности:

- а) аэрация в случае биохимической очистки сточных вод в аэротенках, необходимая для поддержания жизнедеятельности содержащихся в жидкости организмов (активного ила);
- б) аэрация при флотации в случае обогащения руд полезных ископаемых и при очистке сточных вод;
- в) барботирование газа (поступление газа через слой жидкости); в частности, «мокрая очистка газов» от частиц пыли.

Необходимо отличать струйную аэрацию жидкости незатопленной струей от аэрации с помощью струйных аппаратов типа эжекторов, обладающей специфическими особенностями.

Под явлением *аэрации объема жидкости при помощи свободной струи* понимают вовлечение струей жидкости пузырьков окружающего ее газа (воздуха) в некоторый объем той же жидкости.

Жидкость, вытекающая из источника (трубы, сопла, насадка) в покоящуюся газовую среду, образует незатопленную струю (ограниченную сечениями $0-0$ и $1-1$, рис. 1). Благодаря силам трения, возникающим на поверхности струи, в движение приводится и газ (воздух), окружающий струю. При этом незатопленная струя представляет собой двухфазный поток, состоящий из жидкости и газа.

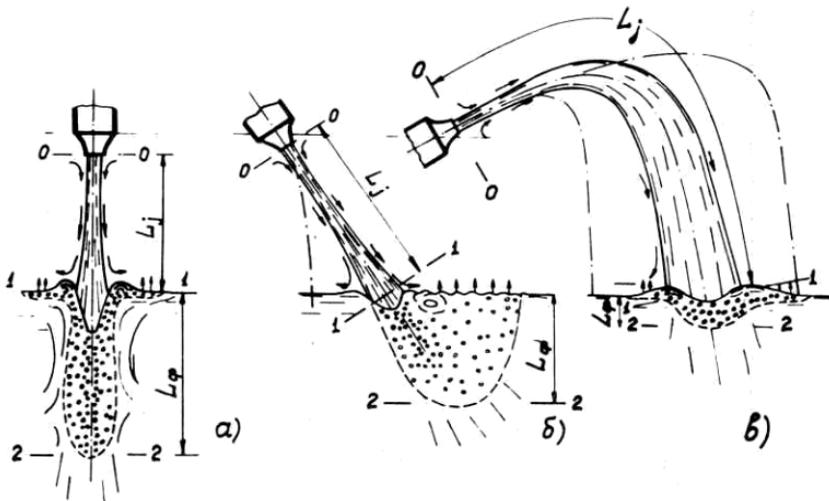


Рис. 1. Схемы формирования незатопленной струи:
а – вертикальной струи; *б* – наклонной нисходящей; *в* – наклонной восходящей

Сплошность движения жидкости в такой струе сохраняется только на определенном (сравнительно небольшом) удалении от выходного отверстия сопла форсунки. В дальнейшем по течению поток жидкости распадается на множество жидких объемов и капель, движущихся в порождаемом ими турбулентном потоке газа.

Распаду потока способствует развитие волнообразных возмущений на поверхности струи жидкости (деформация поверхности раздела). При этом поперечные сечения струи в результате распада потока жидкости («насыщения» его воздухом) увеличиваются по течению, происходит как бы самораспыливание (самодиспергирование) жидкости.

Следует различать вертикальные и наклонные струи. При этом в зависимости от угла наклона оси форсунки незатопленная струя может иметь прямолинейную (рис. 1, *а* и *б*) или криволинейную ось течения (рис. 1, *в*).

Изменение параметров наклонной струи в начальном сечении ($0-0$) приводит к изменению траектории движения жидкости (дальности, высоты) с соответствующим перемещением места сопряжения ее со свободной поверхностью жидкости (см. рис. 1, *в*).

Газожидкостный (двухфазный) поток незатопленной струи, внедряясь в объем жидкости, образует затопленное турбулентное течение смеси жидкости с пузырьками вовлеченного ею газа (см. рис. 1).

В месте соприкосновения струи с жидкостью свободная поверхность жидкости приобретает характерные криволинейные очертания (кратер), обусловленные давлением и растеканием двухфазного потока, а также эрлифтом жидкости (за счет всплывания пузырьков).

Проникновение (вовлечение) газа в объем жидкости происходит за счет его механического захвата в месте соприкосновения струи со свободной поверхностью жидкости.

В результате турбулентного перемешивания пузырьки захваченного струей газа распределяются в пределах некоторого объема жидкости, заключенного между сечениями 1–1 и 2–2 (см. рис. 1). Попадая в область затопленного течения, где скорости равны скорости всплывания пузырьков газа, последние выделяются из потока, в результате чего происходит процесс **деаэрации затопленной струи**.

Деаэрация затопленной струи заключается в выделении в атмосферу находящихся в жидкости пузырьков газа.

Общий объем жидкости, насыщенный пузырьками газа, в дальнейшем будет именоваться **объемом аэрации** или **факелом пузырьков**.

В зависимости от гидравлических характеристик незатопленной струи (ее параметров) в месте ее сопряжения со свободной поверхностью жидкости, а также угла входа струи в жидкость объем аэрации будет иметь ту или другую форму и протяженность вдоль оси струи (см. рис. 1), обусловленные соответствующим насыщением объема пузырьками газа (количеством газа, содержащимся в этом объеме).

Ниже сечения 2–2 по течению (см. рис. 1) имеет место растекание затопленной (однородной) свободной струи. Очевидно, что скорости течения в затопленной струе за пределами факела пузырьков будут меньше скорости всплывания этих пузырьков.

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность процесса аэрирования, является безразмерный **коэффициент аэрации**, характеризующийся объемом газа (воздуха), вносимого струей в объем жидкости:

$$K_3 = \frac{Q_B}{Q_{ж}}, \quad (1)$$

где Q_B – расход аэрируемого газа (воздуха), м³/с;
 $Q_{ж}$ – расход аэрирующей жидкости, м³/с.

Описание лабораторной установки

Исследование процесса аэрации струй в зависимости от конструктивных особенностей форсунок, расходов модельной жидкости, давления и других параметров проводится на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 2.

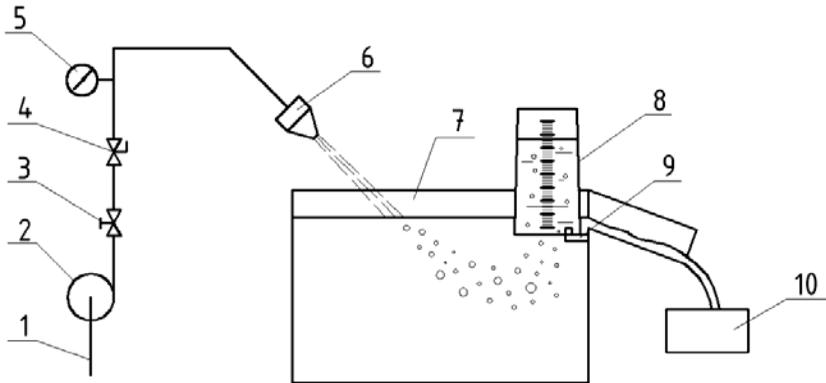


Рис. 2. Схема экспериментального стенда:

1 – всасывающий трубопровод насоса; 2 – центробежный насос; 3 – вентиль для регулировки расхода; 4 – шаровый кран; 5 – манометр; 6 – сопло; 7 – модель флотационной камеры; 8 – мерная емкость для определения расхода воздуха; 9 – упор для фиксации мерной емкости; 10 – мерная емкость для определения расхода воды

В качестве модельной жидкости в работе используется техническая вода, которая подается во всасывающий трубопровод 1 центробежным насосом 2, который используется в качестве насоса подкачки, повышающего давление и расход воды, поступавшей в гидравлическую модель 7.

В лабораторной установке используется насос производительностью до 4 л/с. Вентиль 3, установленный на всасывающем трубопроводе, обеспечивает плавное регулирование давления и расхода воды в системе. Шаровой кран 4 предназначен для подачи воды в масштабную гидравлическую модель через форсунку или сопло 6 в момент начала измерения. Манометр 5 предназначен для фиксации давления воды в напорном трубопроводе, по которому вода насосом 3 подается в форсунку 6, установленную в масштабной гидравлической модели 7 флотационной камеры.

В качестве сопла в работе используется водовоздушная форсунка со сменными головками, которая представлена на рис. 3.

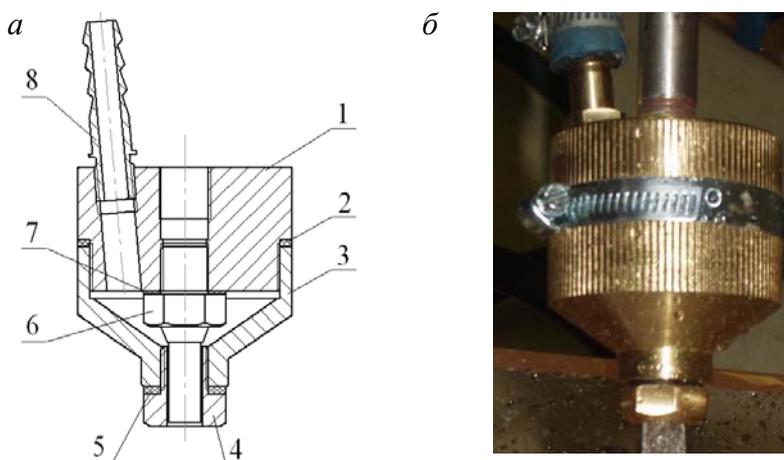


Рис. 3. Схема кольцевой водовоздушной форсунки со сменными головками:
a – схема кольцевой форсунки; *б* – внешний вид кольцевой форсунки;
 1 – днище; 2, 5, 7 – прокладки, герметизирующие корпус и сменные головки;
 3 – корпус; 4 – сменная головка корпуса; 6 – сменная головка днища;
 8 – штуцер для подачи воды

Вода в форсунку подается через штуцер 8, заполняет объем между днищем 1 и корпусом 3 и выходит из форсунки через щелевой зазор между наружной поверхностью сменной головки 6 днища и внутренней поверхностью сменной головки 4 корпуса (см. рис. 3).

Сменные головки ввинчиваются в осевое отверстие дна l (см. рис. 5), и их внутренняя полость сообщается с атмосферой, благодаря чему внутренний объем кольцевой струи заполнен воздухом (рис. 4).

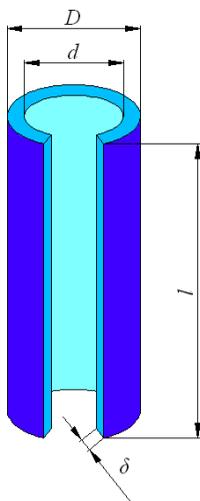


Рис. 4. Схема струй кольцевого сечения

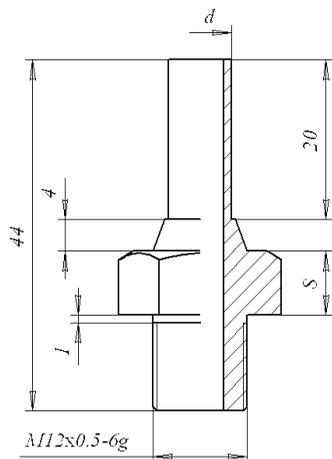


Рис. 5. Сменная головка дна

Наружная поверхность струи формируется сменной головкой корпуса, которая представлена на рис. 6.

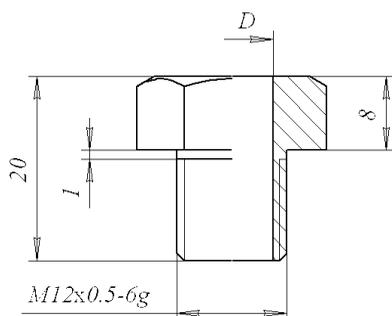


Рис. 6. Сменная головка корпуса

Конструкция универсальной кольцевой форсунки позволяет изучать истечение не только струй кольцевого сечения, но и вариант истечения из сопел струй круглого сечения с наружным диаметром D от 5 мм до 9 мм.

Величины площадей живого сечения струй при различном сочетании диаметров сменных головок представлены в табл. 1, где S – площадь живого сечения круглой струи; D – наружный диаметр струи; d – внутренний диаметр струи кольцевого сечения.

Таблица 1

Площади живого сечения струй для универсальной кольцевой форсунки со сменными головками

S , мм ²	D , мм	d , мм			
		4	6	7	8
19,63	5	7,07	–	–	–
38,48	7	25,92	10,21	–	–
50,27	8	37,70	21,99	11,78	–
63,62	9	51,05	35,34	25,13	13,35

Для изменения проведения этих исследований необходимо из днища 1 (см. рис. 3) вывинтить сменную головку 6 днища и в образовавшееся отверстие вставить пробку-заглушку, которая будет предотвращать подсос воздуха из атмосферы во внутреннюю полость форсунки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить форсунку 6 (см. рис. 2) под углом к поверхности воды, находящейся в модели. До начала опыта измерить расстояние от нижнего торца сопла форсунки до поверхности воды в модели.
2. Полностью открыть шаровой кран 4.
3. Открыть вентиль 3 и установить минимальный расход воды через форсунку.
4. С помощью мерной емкости и секундомера определить расход воды через форсунку.
5. С помощью предварительно заполненного водой мерного стакана и секундомера определить расход воздуха, аэрируемого струей.
6. Измерение осуществить три раза при одном и том же расходе воды.
7. Увеличить расход воды и вновь осуществить измерения.
8. Измерить параметры при четырех различных расходах воды.
9. Обработать результаты измерений и данные занести в табл. 2.

Таблица 2

Измеренные значения

№ п/п	Давление P , кгс/см ²	Воздух		Вода			Скорость на выходе из форсунок U , см/с	Число Рейнольдса Re	Коэффициент аэрации $K = Q_{в}/Q_{ж}$
		Длительность τ_1 , с	Расход $Q_{в}$, см ³ /с	Длительность заполнения мерной емкости τ_2 , с	Высота уровня в мерной емкости	Объем W , см ³			

Определение расхода аэрированного воздуха и воды

Расход аэрированного воздуха определяется с помощью стеклянного мерного стакана. Мерный стакан 1 (рис. 7) погружается под уровень заполняющей масштабную модель флотокамеры воды и заполняется ею таким образом, чтобы в его объеме отсутствовали пузырьки воздуха. Затем стакан переворачивается кверху дном и поднимается над уровнем воды. На боковой поверхности стакана нанесены деления. Цена одного деления 20 см^3 . Таким образом, с помощью мерного стакана можно измерять объем от 20 до 1000 см^3 .

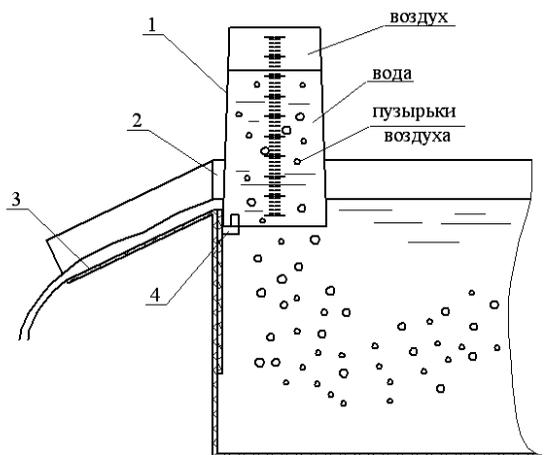


Рис. 7. Схема измерения объема аэрированного струей воздуха:
1 – мерный стакан; 2 – масштабная модель флотокамеры; 3 – сливной лоток;
4 – опора мерного стакана

Перед началом измерения закрывается кран 4 (см. рис. 2), установленный на нагнетательном трубопроводе, и прекращается подача воды в модель флотокамеры.

Перевернутый кверху дном стакан приподнимается вверх таким образом, чтобы его кромка была погружена под уровень воды на глубину 1,0–1,5 см. При этом стакан внутри полностью заполнен водой, которая удерживается за счет образующегося в нем вакуума.

Заполненный водой стакан устанавливают на опору 4 (см. рис. 7). Наличие опоры 4 позволяет во всех опытах располагать стакан в одном и том же месте модели и на одной и той же глубине относительно поверхности воды. После установки заполненного водой мерного стакана 1 на опору 4 можно начинать измерение объема воздуха, аэрированного струей воды, поступающей в масштабную модель, для чего открывают шаровой кран 4, установленный в нагнетательном трубопроводе насоса 2 (см. рис. 2). При этом вода начинает поступать через форсунку в модель, увлекая с собой воздух и вытесняя из мерного стакана находящуюся там воду.

Когда уровень воды в стакане опускается до отметки 20 см^3 от уровня днища, включается секундомер. В момент времени, когда уровень воды достигает отметки 800 см^3 , секундомер выключается. Таким образом фиксируется длительность вытеснения из мерного стакана 780 см^3 воды воздухом, давление которого практически соответствует атмосферному.

Измерение расхода воды через форсунку осуществляется с использованием мерной емкости 9 (см. рис. 2), представляющей собой цилиндрическую металлическую емкость, внутри которой на стенке закреплена линейка, позволяющая определять высоту уровня воды в емкости от дна с точностью $\pm 1 \text{ мм}$. Общий объем мерной емкости составляет $W = 4,5 \text{ л}$. Мерная емкость подставляется под лоток модели, и стекающая из лотка вода поступает в емкость. В момент начала заполнения емкости включают секундомер, который фиксирует длительность заполнения мерной емкости водой. В произвольный момент времени емкость извлекается из-под лотка, и секундомер в этот момент времени останавливается.

После завершения заполнения емкости с помощью имеющейся в ней линейки определяют высоту уровня воды в емкости. До начала экспериментов была осуществлена тарировка мерной линейки емкости и построен тарировочный график.

После завершения измерения расходов воздуха и воды результаты измерений вносятся в таблицу, причем каждое измерение повторяется не менее трех раз.

Обработка опытных данных

1. Расход воздуха и воды определить по формуле

$$Q = \frac{W}{\tau}, \quad (2)$$

где W – объем воздуха или воды в мерной емкости;
 τ – длительность вытеснения воды из мерного стакана или заполнения водой мерной емкости.

2. По расходу воды $Q_{\text{ж}}$ рассчитать среднюю скорость v жидкости на выходе из форсунки

$$v = \frac{Q_{\text{ж}}}{S},$$

где $Q_{\text{ж}}$ – расход воды, $\text{см}^3/\text{с}$, определяется по формуле (2);
 S – площадь сечения выходного отверстия форсунки, см^2 (см. табл. 1).

3. Рассчитать число Рейнольдса по формуле

$$\text{Re} = \frac{vD}{\nu},$$

где v – скорость движения жидкости на выходе из форсунки;
 D – диаметр форсунки;
 ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

4. По формуле (1) рассчитать коэффициент аэрации.

5. Данные измерений и вычислений занести в табл. 2.

По опытным значениям расхода воды $Q_{\text{в}}$ и коэффициента аэрации K , на миллиметровой бумаге в масштабе строятся графики зависимостей: $K = f(Q_{\text{ж}})$; $K = f(v)$; $K = f(\text{Re})$, рис. 8–10.

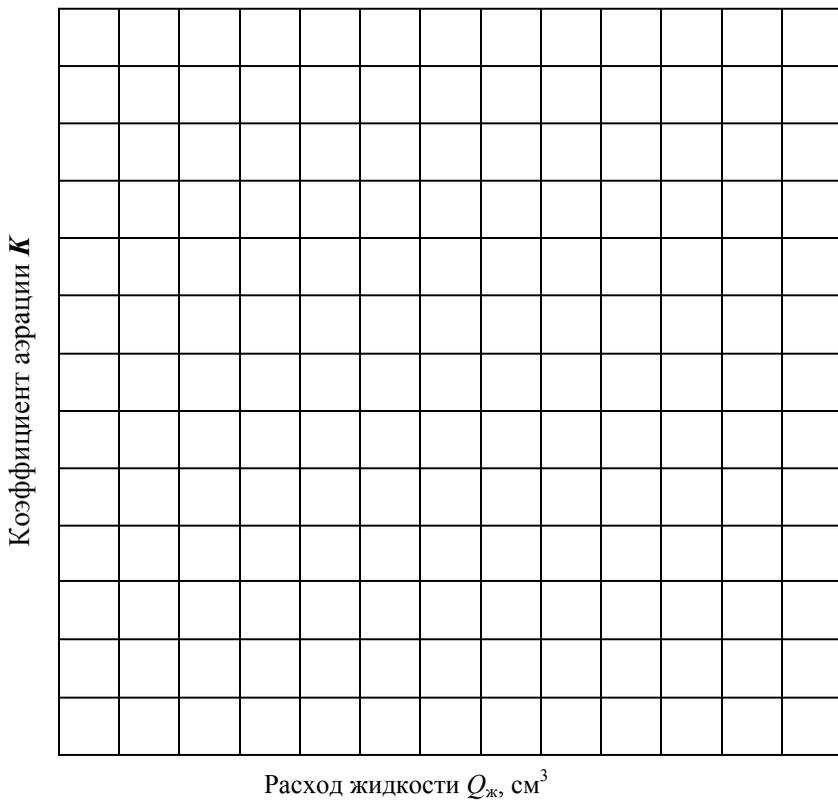


Рис. 8. Зависимость коэффициента аэрации от расхода жидкости

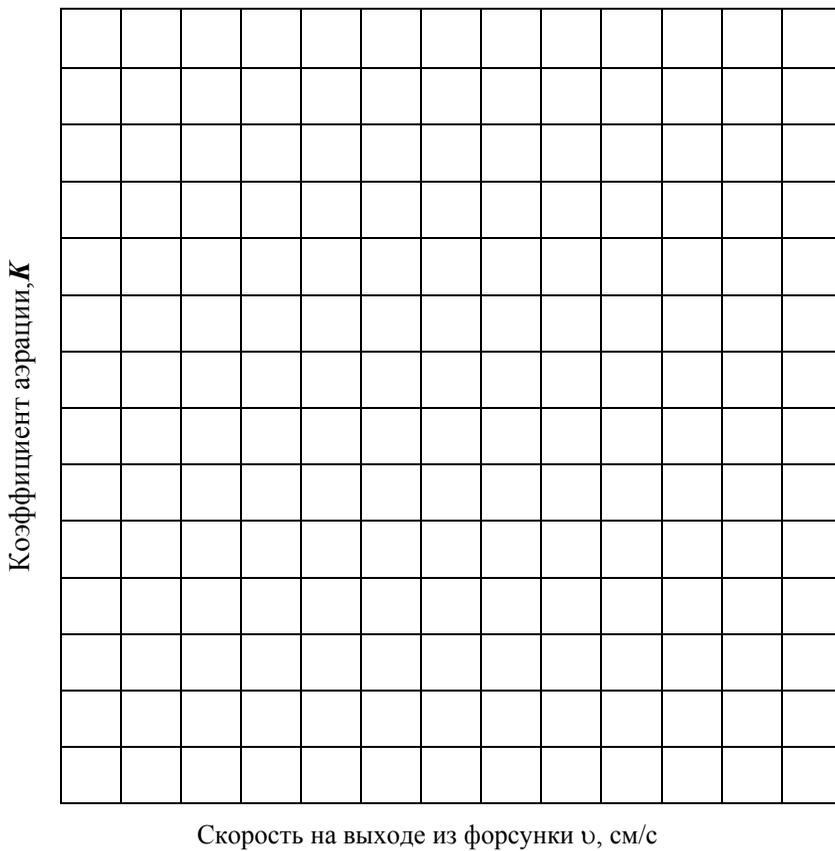


Рис. 9. Зависимость коэффициента аэрации от скорости на выходе из форсунки

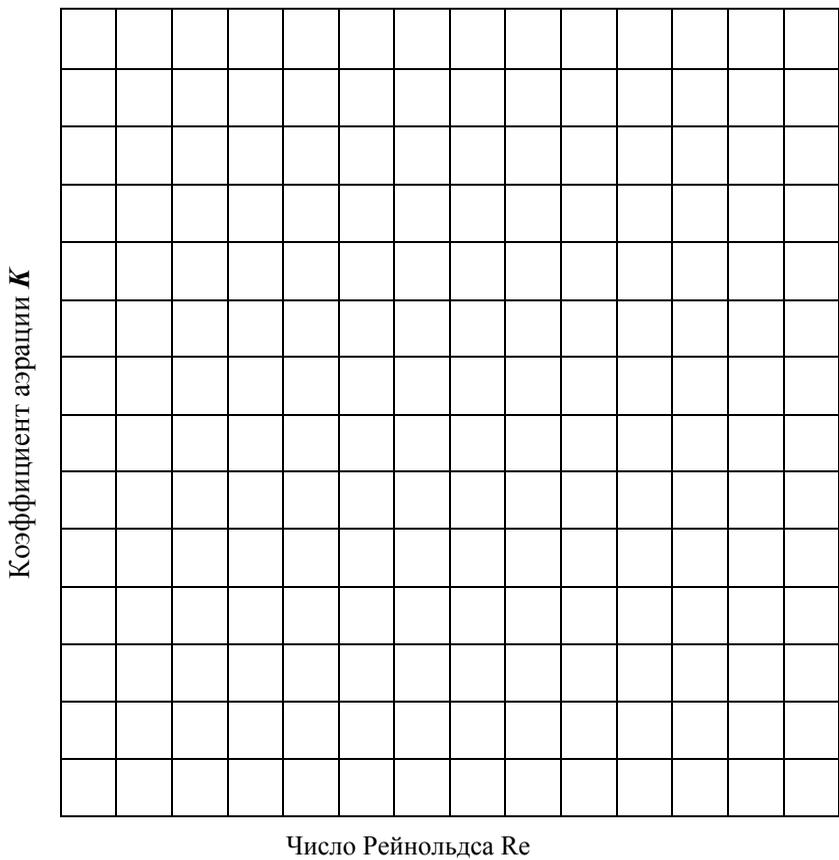


Рис. 10. Зависимость коэффициента аэрации от числа Рейнольдса

Учебное издание

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ
КОЭФФИЦИЕНТА АЭРАЦИИ**

Методические указания
для выполнения лабораторной работы
по дисциплине «Механика жидкости и газа»
для студентов специальностей

1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью»,
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций»

Составители:

ЛЕДЯН Юрий Павлович
ЩЕРБАКОВА Мария Константиновна

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 14.04.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 100. Заказ 724.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.