

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**для выполнения лабораторной работы**  
**«ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ НА**  
**ЭЛЕМЕНТЕ НУТЧ - ФИЛЬТРА»**

по курсам: «Процессы и аппараты химической технологии»,  
«Типовые технологические объекты и процессы производств»,  
«Процессы и аппараты биотехнологических производств»,  
«Гидрогазодинамика»

Харьков  
2018



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

### **для выполнения лабораторной работы «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЕ НУТЧ - ФИЛЬТРА»**

по курсам: «Процессы и аппараты химической технологии»,  
«Типовые технологические объекты и процессы производств»,  
«Процессы и аппараты биотехнологических производств»,  
«Гидрогазодинамика»

для студентов химико-технологических  
и энергомашиностроительных специальностей  
всех форм обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
протокол № 3 от 22.12.2016 г.

Харьков  
2018

Методические указания к лабораторной работе «Изучение процесса фильтрования на элементе нутч-фильтра» по курсам «Процессы и аппараты химической технологии», «Типовые технологические объекты и процессы производств», «Процессы и аппараты биотехнологических производств», «Гидрогазодинамика» для студентов химико-технологических и энергомашиностроительных специальностей всех форм обучения.

/Сост. Ю.А. Толчинский, Е.И. Литвиненко, Е.Е. Делова, А.В. Пономаренко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018.– 16 с.

Составители: Ю.А. Толчинский  
Е.И. Литвиненко  
Е.Е. Делова  
А.В. Пономаренко

Рецензент: доц. каф. ИТПА С.Н. Быканов

Кафедра интегрированных технологий, процессов и аппаратов

## ВСТУПЛЕНИЕ

**Цель работы:** изучить процесс разделения суспензии на элементе нутч-фильтра, определить константы фильтрования и характеристики осадка и суспензии, производительность элемента нутч-фильтра.

## ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ

**Фильтрование** применяется в различных отраслях промышленности для разделения суспензий, эмульсий, пыли и т.п. Осуществляют процесс фильтрования с помощью фильтровальной перегородки, которая задерживает дисперсную фазу и пропускает сплошную.

Для обеспечения фильтрования необходимо обеспечить разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. Осуществляют процесс фильтрования в аппаратах, называемых фильтрами. В данной работе используется элемент нутч-фильтра, в котором разность давления создается за счёт разрежения в пространстве под фильтровальной перегородкой.

Скорость процесса фильтрования пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению, то есть пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости фильтрата, общему гидравлическому сопротивлению слоя осадка и фильтровальной перегородки. Различные режимы фильтрования описывают соответствующие уравнения, для решения которых необходимо опытным путём определить константы фильтрования, характеризующие удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтровальной перегородки. Для определения этих констант и выполняется данная работа.

Процесс фильтрования представляет собой такой процесс, который можно проанализировать с помощью уравнения Бернулли для реальной жидкости. Элемент нутч-фильтра можно себе представить как отрезок прямой трубы, в которой протекает суспензия. В объеме трубы располагается суспензия, подлежащая разделению и осадок, с протекающей через него частично очищенной жидкостью. Почти весь объем трубы занимает суспензия, осадок занимает лишь незначительную

часть объема. Для протекания суспензии необходимо приложить к торцам трубы разность давлений. Эта разность давлений расходуется на преодоление гидравлического сопротивления трубы, которое состоит из двух сопротивлений: одно – сопротивление трения протекающей суспензии через ту часть трубы, которая свободна от осадка. Другое сопротивление – это сопротивление той части трубы, которая занята осадком. В этой части трубы сопротивление протеканию возникает из-за взаимодействия потока суспензии и осадка. В объеме осадка происходит дробление потока суспензии на множество отдельных малых потоков, которые движутся через цепочки межчастичных пор.

Каждую такую цепочку можно представить себе как трубу очень малого диаметра с предельной допустимой шероховатостью, величина которой составляет половину диаметра трубы. Сам осадок можно представить как множество малых труб с предельной допустимой шероховатостью, расположенных параллельно друг другу. Такие малые трубы могут изменять свое направление так, что длина отдельной малой трубы с одним концом, выходящим на границу между осадком и суспензией, и другим концом, выходящим на фильтрующую перегородку, может быть больше толщины слоя осадка. Такое увеличение длины малой трубы приводит к увеличению её гидравлического сопротивления. Ещё одной причиной, которая приводит к увеличению гидравлического сопротивления осадка, является наличие предельно допустимой шероховатости. Такая шероховатость формируется поверхностями частиц. Если предположить, что частицы осадка имеют форму не слишком отличающуюся от сферической, то малая труба представляется состоящий из последовательно сужающихся и расширяющихся участков, сечение которых представляет собой криволинейный треугольник. Все сказанное представлено на рис. 1, 2.

В настоящей лабораторной работе очистке путём фильтрования подвергается конечная порция суспензии. Это означает, что уровень суспензии в ходе опытов со временем снижается. Для горизонтально расположенного элемента нутч-фильтра во время опыта длина отрезка трубы, занятого суспензией уменьшается, а длина отрезка трубы, занятого осадком увеличивается рис 1б. При этом разница давлений  $P_1 - P_2$  остаётся постоянной.

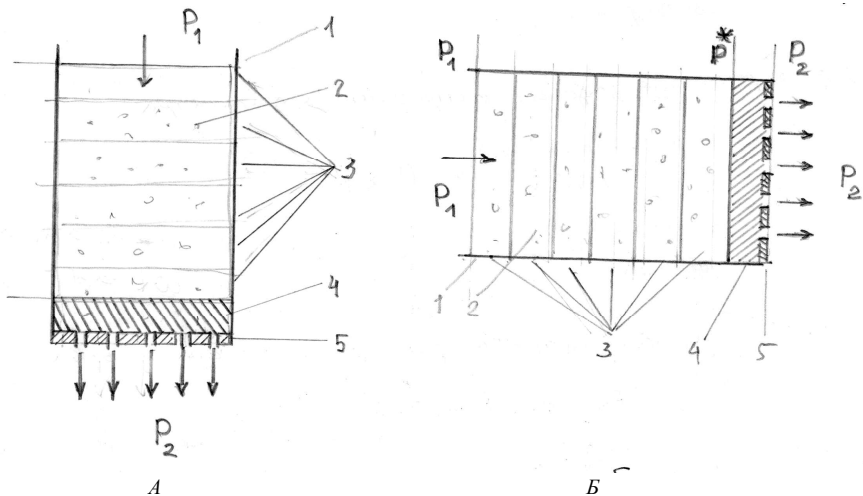


Рисунок 1 – Течение в элементе нутч фильтра:

*a* – реальное расположения элемента, *б* – расположения элемента, удобное для наглядного применения уравнения Бернулли:

1 – стенка корпуса; 2 – суспензия; 3 – положение уровня суспензии в различные моменты времени; 4 – осадок; 5 – фильтровальная перегородка.

$P_1$ ,  $P_2$ ,  $P^*$  – давление над суспензией, под фильтровальной перегородкой и на внешней поверхности слоя осадка соответственно.

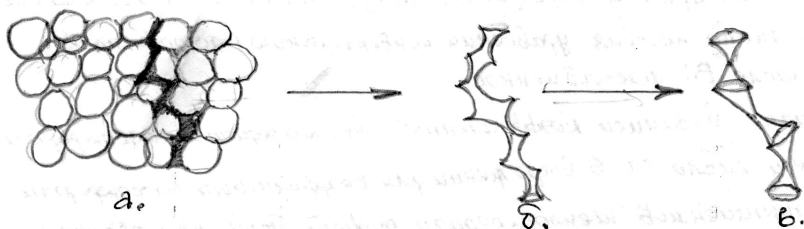


Рисунок 2 – Микроскопическое строение осадка:

*a* – элемент объема осадка; *б* – отдельная малая труба, состоящая из межчастичных пор; *в* – модель малой трубы, состоящая из последовательно соединённых сужений и расширений

Такое возможно только, если толщина осадка увеличивается, а скорость фильтрации уменьшается. Разность давлений  $P_1 - P_2$  состоит из двух слагаемых: первое слагаемое – это разность давлений между свободным торцом трубы и границы между суспензией и осадком; второе слагаемое – это разность давлений между верхним слоем осадка и фильтрующей перегородкой.

Лабораторная работа состоит из двух частей. В первой части работы по данным опыта определяется сопротивление осадка и фильтровальной перегородки. Во второй части определяются объемная и поверхностная скорости жидкости в осадке, вязкость суспензии и характерный размер частиц, из которых состоит осадок, а также потери давления на участке течения суспензии и на участке расположения осадка.

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для изучения процесса фильтрации и определения констант фильтрации представлена на рис. 3.

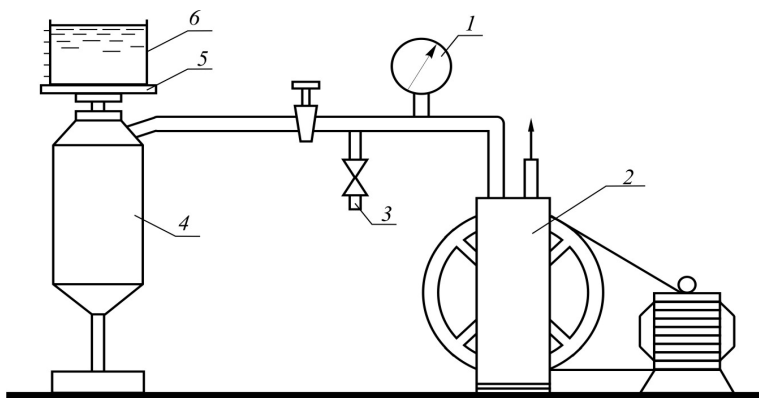


Рисунок 3 – Установка для изучения процесса фильтрации

Установка состоит из фильтра *б* с двойным решетчатым дном *5*, на котором находится фильтр сборника фильтрата *4*, вакуумного насоса *2*, вакуумметра *1* и регулирующего вентиля *3*. Суспензия разделяется с помощью фильтровальной перегородки на осадок, который остается на фильтре, и фильтрат, который собирается в сборнике *4*. Глубина вакуума в сборнике регулируется вентилем *3* и контролируется вакуумметром *1*.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить схему установки и приготовить суспензию.
2. Включить вакуумный насос.
3. Залить приготовленную суспензию в цилиндр *б* в количестве, указанном преподавателем.
4. Установить вентилем *3* заданный вакуум.
5. Включить секундомер при достижении необходимого вакуума в сборнике *4* и отмечать время прохождения суспензией каждой метки на цилиндре *б*, вплоть до окончания процесса фильтрации.
6. Остановить секундомер после окончания фильтрации и выключить вакуум насос.
7. Замерить толщину слоя осадка на фильтре.
8. Измерить количество фильтрата в сборнике.
9. Результаты замеров свести в таблицу 2.
10. Снять с фильтра осадок, соединить его с фильтратом и перенести суспензию в исходную ёмкость.
11. Промыть установку водой.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Графически определить константы фильтрации ( $K, C$ ).
2. По данным таблицы 2 вычислить отношение  $\Delta\tau_j/\Delta V$ ,  $c/(m^3/m^2)$ .
3. Объемы фильтрата, полученные в процессе фильтрации  $V_j$  за время  $\Delta\tau_j$ , а также приращение объемов  $\Delta V = 0,1$  выразить в  $m^3/m^2$  поверхности фильтра, (разделив величины объемов, выраженные в  $m^3$ , на поверхность фильтра  $S_{\perp}$ ,  $S_{\perp} = 0,0075 m^2$ ).

4. Построить график зависимости  $\Delta\tau_i/\Delta V = f(V_i)$  (рис. 4).

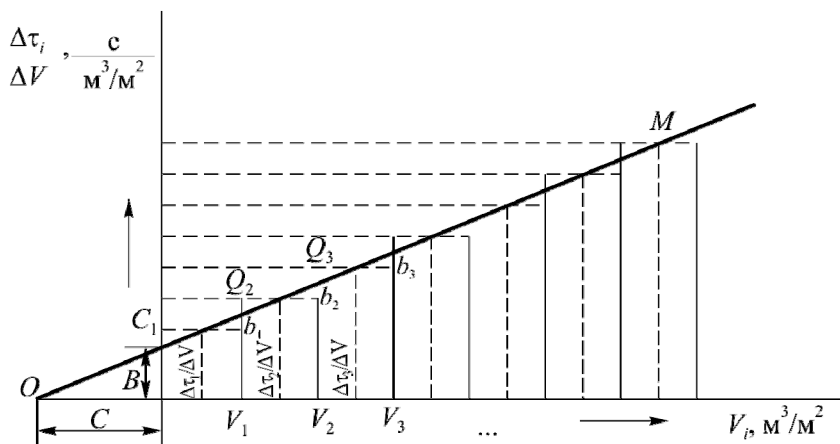


Рисунок 4 – График зависимости  $\Delta\tau_i/\Delta V = f(V_i)$

Так как отношения  $\Delta\tau_i/\Delta V$  являются средней величиной для соответствующих интервалов  $V_i$ , то величины этих отношений следует откладывать по вертикали из середины однозначных интервалов. Зависимость между величинами  $\Delta\tau_i/\Delta V$  и  $V_i$  прямолинейная и выражается уравнением:

$$\frac{\Delta\tau_i}{\Delta V} = \frac{2}{K} V_i + \frac{2C}{K}, \quad (1)$$

где  $K$  – константа фильтрации, учитывающая режим процесса фильтрации и физико-химические свойства осадка и фильтрата,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C$  – константа фильтрации, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;  $\tau$  – продолжительность фильтрации, с.

5. Определить по полученному графику тангенс угла наклона прямой  $OM$  к оси абсцисс как отношение противолежащего катета к прилежащему в соответствующем масштабе.

6. По величине тангенса угла наклона определить константу  $K$ .  
 Так как по уравнению прямой  $OM \operatorname{tg} \alpha = 2/K$ , то

$$K = \frac{2}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

7. Константу можно определить непосредственным измерением отрезка, отсекаемого прямой  $OM$  на оси абсцисс (с учетом масштаба) или из уравнения прямой  $OM$ , где  $2C/K$  есть отрезок  $B$ , отсекаемый прямой на оси ординат,  $B = 2C/K$ , тогда:

$$C = \frac{KB}{2}. \quad (3)$$

8. Рассчитать скорость фильтрования в начальный и конечный моменты времени фильтрования в  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  по уравнениям:

$$\left( \frac{dV}{d\tau} \right)_{\text{нач}} = \frac{K}{2(V_{\text{н}} + C)}, \quad (4)$$

$$\left( \frac{dV}{d\tau} \right)_{\text{кон}} = \frac{K}{2(V_{\text{к}} + C)}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{н}}$  – количество фильтрата в начальный момент фильтрования,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ,  $V_{\text{н}} = 0$ ;  $V_{\text{к}}$  – общее количество фильтрата, собранное в процессе фильтрования и отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтра,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ,  $V_{\text{к}} = V_{\text{общ}}/S_{\perp}$ ;  $V_{\text{общ}}$  – общее количество фильтрата, собранное за время опыта,  $\text{м}^3$ .

9. Рассчитать часовую производительность фильтра, в  $\text{м}^3/\text{ч}$ , по фильтрату ( $V_{\text{ф}}$ ) и влажному осадку ( $V_{\text{ос}}$ ):

$$V_{\text{ф}} = \frac{3600 V_{\text{общ}}}{\tau}, \quad (6)$$

$$V_{\text{ос}} = \frac{3600 S_{\perp} h_{\text{ос}}}{\tau}, \quad (7)$$

где  $h_{\text{ос}}$  – средняя высота слоя полученного осадка, м.

4. Рассчитать сопротивление осадка ( $R_{\text{ос}}$ ) и фильтрующей перегородки ( $R_{\text{ф.п}}$ ), в  $\text{м}^{-1}$ :

$$R_{\text{ос}} = r_0 h_{\text{ос}}; \quad (8)$$

$$R_{\text{ф.п}} = Cr_0 x_0; \quad (9)$$

$$r_0 = \frac{2\Delta p}{\mu x_0 K}, \quad (10)$$

где  $r_0$  – удельное сопротивление слоя осадка,  $\text{м}^{-2}$ ;  $x_0$  – отношение объема осадка к объему фильтрата;  $\mu$  – вязкость жидкой фазы, Па·с;  $\Delta p$  – движущая сила процесса, Па.

$$\Delta p = p_2 - p_1,$$

где  $p_2$  – давление над фильтрующей перегородкой, Па;

$$p_2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па},$$

$p_1$  – давление под фильтрующей перегородкой (Па) определить по показанию вакуумметра.

5. Расчетные данные свести в таблицу 2.

## РАСЧЁТЫ ПО ВТОРОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Расчёты по второй части работы состоят из следующих этапов.

1. Вычисление вязкости суспензии по формуле:

$$\mu_{\text{сусп}} = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} \varepsilon_{\text{сусп}} \right); \quad \varepsilon_{\text{сусп}} = \frac{h_{0c}}{H}, \quad (11)$$

где  $\mu_{\text{сусп}}$  – вязкость суспензии, Па·с;  $\mu_0$  – вязкость чистой воды при температуре в лаборатории, Па·с;  $\varepsilon_{\text{сусп}}$  – объемная доля твёрдой примеси в суспензии, б/р;  $H$  – высота налива суспензии в начальный момент времени, м.

2. Вычисление числа Рейнольдса суспензии по формуле:

$$\text{Re}_{\text{сусп}} = \frac{\rho_{\text{сусп}} \langle w \rangle D}{\mu_{\text{сусп}}}. \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{сусп}}} = \frac{1 - \varepsilon_{\text{сусп}}}{\rho_0} + \frac{\varepsilon_{\text{сусп}}}{\rho_{\text{прим}}}, \quad (13)$$

где  $\text{Re}_{\text{сусп}}$  – число Рейнольдса суспензии, б/р;  $D$  – диаметр корпуса элемента нутч-фильтра, м;  $\rho_0$  – плотность воды при температуре в лаборатории, кг/м<sup>3</sup>;  $\langle w \rangle$  – среднее значение скорости суспензии за время опыта, м/с.

3. Вычисление средней скорости суспензии по формуле:

$$\langle w \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\perp}} \cdot \frac{dV}{d\tau} \right\rangle. \quad (14)$$

4. Вычисление среднеобъемной и среднеповерхностной скоростей частично очищенной суспензии в осадке по формулам:

$$\langle w \rangle_V = \frac{\langle w \rangle}{1 - \varepsilon}; \quad \langle w \rangle_S = \frac{\langle w \rangle}{(1 - \varepsilon)^{2/3}}, \quad (15)$$

где  $\langle w \rangle_V$  – среднеобъемная скорость, м/с;  $\langle w \rangle_S$  – среднеповерхностная скорость, м/с;  $1 - \varepsilon$  – пористость осадка, б/р. При вычислении принимаем  $\varepsilon = 0,72$ .

5. Вычисление потери давления на участке течения суспензии вне осадка по формуле:

$$P_1 - P^* = \frac{\lambda H}{D} \cdot \frac{\rho_{\text{сусп}} \langle w \rangle^2}{2}; \quad \lambda = \frac{48}{\text{Re}_{\text{сусп}}}. \quad (16)$$

6. Вычисление характерного размера частиц осадка по формуле:

$$d = \left\{ \frac{\mu_0 \frac{320}{\sqrt{\pi}} \text{И} \frac{\langle h \rangle}{2} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{2/3} \left( \frac{\pi}{6} \right)^{2/3} \langle w \rangle}{P_1 - P_2} \right\}^{1/2}; \quad \text{И} = \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

где И – извилистость малой трубы в осадке, б/р.

## ОПИСАНИЕ ОТЧЁТА О РАБОТЕ

1. Цель работы.
2. Схема установки с эксликацией её частей.
3. Расчёты по пунктам 1 – 4 первой части.
4. Расчёты по пунктам 1 – 6 второй части.
5. Таблица экспериментальных величин.
6. Таблица расчётных величин по пунктам 1 – 4 первой части.
7. Таблица расчётных величин по пунктам 1 – 6 второй части.

## Контрольные вопросы

1. Зачем нужен процесс фильтрации?
2. Какие бывают осадки?
3. Как жидкость протекает через слой осадка?
4. Зачем нужна фильтровальная перегородка?
5. Вязкость суспензии больше вязкости чистой жидкости или нет?
6. Какую суспензию труднее фильтровать: холодную или горячую?
7. Какую суспензию легче перекачивать: холодную или горячую?
8. Почему осадок можно представлять себе как совокупность извилистых шероховатых трубок?
9. Какой может быть величина шероховатости в трубе?
10. Какой гидродинамический режим является характерным при фильтрации?
11. Может ли пористое тело иметь большую пористость, но малую проницаемость?
12. Может ли пористое тело иметь малую пористость, но большую проницаемость?
13. Почему среднеобъемная и среднеповерхностная скорости течения жидкости в осадке неодинаковы?
14. Может ли толщина слоя осадка уменьшаться в ходе фильтрации?
15. Почему величина  $r_0$  гораздо больше величины  $R_{oc}$ ? Может ли быть наоборот?

## Литература

1. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1 / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.П. ГОТЛИНСКАЯ, В.А. ЛЕЩЕНКО и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – 632 с.
2. Лабораторный практикум по курсу Основные процессы и аппараты химической технологии: уч. пособие / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.П. ГОТЛИНСКАЯ, В.А. ЛЕЩЕНКО и др., под. ред. ТОВАЖНЯНСКОГО Л.Л. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 420 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Величина вакуума, мм.рт.ст. \_\_\_\_

Таблица 1 – Экспериментальные величины

Количество суспензии $V_j, \text{м}^3$	
Удельное количество суспензии $V_j / S_{\perp}, \text{м}^3/\text{м}^2$	
Удельное приращение количества суспензии $\Delta V_j / S_{\perp}, \text{м}^3/\text{м}^2$	
Время от начала фильтрования $\tau_j, \text{с}$	
Приращение времени фильтрования $\Delta \tau_j, \text{с}$	
Относительное $\Delta \tau_j / (\Delta V_j / S_{\perp}), \text{с}/(\text{м}^3/\text{м}^2)$	

Таблица 2 – Расчетные величины по пунктам части 1

$\Delta p, \text{Па}$	
$K, \text{м}^2/\text{с}$	
$C, \text{м}^3/\text{м}^2$	
$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{\text{нач}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	
$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{\text{кон}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	
$V_{\text{ф}}, \text{м}^3/\text{ч}$	
$V_{\text{ос}}, \text{м}^3/\text{ч}$	
$r_0, \text{м}^{-2}$	
$R_{\text{ос}}, \text{м}^{-1}$	
$R_{\text{фп}}, \text{м}^{-1}$	

Таблица 3 – Расчетные величины по пунктам части 2

$\mu_{\text{сусп}}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{Re}_{\text{сусп}}, \text{б/п}$	$\langle w \rangle_V, \text{м/с}$	$\langle w \rangle_S, \text{м/с}$	$\lambda, \text{б/п}$	$d, \text{м}$
---	---------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------	---------------

Навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**для виконання лабораторної роботи  
«ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ НА ЕЛЕМЕНТІ  
НУТЧ - ФИЛЬТРУ»**

для студентів хіміко-технологічних  
і енергомашинобудівних спеціальностей  
всіх форм навчання

Російською мовою

У к л а д а ч і :

ТОЛЧИНСЬКИЙ Юрій Абрамович  
ЛИТВИНЕНКО Євгенія Ігорівна  
ДЕЛОВА Олена Євгенійовна  
ПОНОМАРЕНКО Ганна Володимирівна

Відповідальний за випуск проф. *В. Є. Ведь*  
Роботу до друку рекомендувала доц. *Н. М. Самойленко*  
В авторській редакції

План 2016 р., поз. 18.

Підп. до друку 20.03.2018 р. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Папір офісний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.1,0 . Наклад 50 прим.  
Зам. № . Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХП».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
61002 Харків, вул. Кирпичова, 21

---

Друкарня НТУ «ХП», 61002 Харків, вул. Кирпичова, 21