

С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев

**Методические указания
к выполнению практических работ
по дисциплине «Механика сплошной среды»**



**Ижевск
2014**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет»
Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых
месторождений

С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев

**Методические указания
к выполнению практических работ
по дисциплине «Механика сплошной среды»**



**Ижевск
2014**

УДК 622.24.026(075.8)
ББК 33.131.0я73-5
М152

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ
(протокол № 7, от 23.12.2014)*

Рецензент: д.т.н., профессор Н. В. Митюков

С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев

М152 Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Механика сплошной среды». – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2014. – 20 с.

Учебно-методическое пособие составлено на основе требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Пособие состоит из четырёх работ, которые посвящены процессам, возникающим при промывке и цементировании скважин.

Пособие предназначено для студентов бакалавриата по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» для профилю подготовки «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти» и «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства».

УДК 622.24.026(075.8)
ББК 33.131.0я73-5

© С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, 2014
© ФГБОУ ВПО «Удмуртский
государственный университет», 2014

Содержание

Предисловие	4
Практическая работа №1. Расчёт гидравлических потерь при движении бурового раствора	5
Практическая работа №2. Определение забойного давления при спуске (подъёме) колонны труб	9
Практическая работа №3. Определение допустимой скорости спуска (подъёма) колонны труб	12
Практическая работа №4. Определение плотности бурового раствора	14
Список рекомендуемой литературы	17
Приложение 1. Характер сужения допустимого интервала по времени	17
Приложение 2. Пример оформления отчёта	18

Предисловие

Большинство основных и сопутствующих процессов в нефтегазовом деле механического происхождения. С позиции механики буровой и цементные растворы, горные породы, бурильные колонны и обсадные трубы – сплошные среды.

В настоящее время опубликовано много литературы, посвящённой частным задачам механики сплошных сред в нефтегазовом деле. Целью данного пособия является систематизация учебного материала механики сплошной среды в нефтегазовом деле и представление его в качестве практических работ для лучшего усвоения студентами. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Механика сплошной среды» являются дополнением к лекционному курсу, которое поможет студенту закрепить теоретические навыки, полученные на лекциях, при решении поставленных задач с применением ЭВМ. Студенты могут использовать пособие при подготовке к экзамену.

Методические указания содержат четыре практических работы, которые посвящены процессам, возникающим при промывке и цементировании скважин, а именно: циркуляции бурового раствора в скважине, влиянию скорости спуска колонны труб на изменение величины забойного давления и устойчивости, и целостности стенок скважины в течение времени процесса промывки.

Учебно-методическое пособие, в первую очередь, предназначено для студентов бакалавриата по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» для профилей подготовки «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти» и «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства».

Практическая работа №1. Расчёт гидравлических потерь при движении бурового раствора

В процессах промывки и цементирования скважин при движении бурового раствора по трубам и в затрубном пространстве (см. рисунок 1) возникают местные и путевые гидравлические потери давления. Местные гидравлические потери возникают на клапанах, в местах разворота потока, в сужениях труб и в др. случаях. Путевые гидравлические потери - это потери на трение при течение бурового раствора по длине канала. На основании значений суммарных гидравлических потерь рассчитывается необходимое давление на входе в бурильную колонну и осуществляется подбор насосного оборудования для промывки скважины.

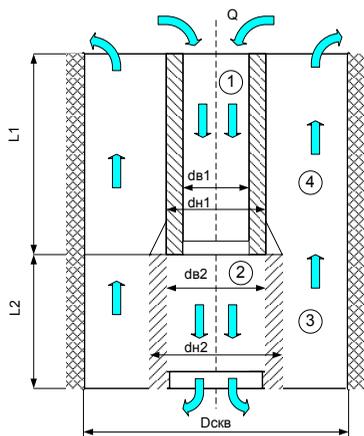


Рисунок 1 – Схема движения бурового раствора в скважине

Задание

Найти величину суммарных гидравлических потерь при установившейся циркуляции бурового раствора по трубам и в затрубном пространстве скважины. Компонка бурильной колонны состоит из утяжеленных бурильных труб (УБТ) и бурильных труб (БТ). Варианты заданий приведены в таблице 1.

Рекомендация к решению работы № 1

Последовательно вычисляются параметры в трубах

1. Определяется средняя скорость потока:

$$v_{cp} = \frac{4Q}{\pi d_g^2}, \text{ м/с}$$

2. Вычисляется параметр Сен-Венана для трубы:

$$Sen_m^* = \frac{\tau_0 d_g}{\eta v_{cp}}$$

3. Вычисляется обобщенный параметр Рейнольдса:

$$Re_m^* = \frac{\rho v_{cp} d_g}{\eta \left(1 + \frac{1}{6} Sen_m^*\right)}$$

4. В зависимости от режима течения определяется коэффициент сопротивления:

$$\lambda = \begin{cases} 64/Re_m^* & \text{при } Re_m^* < 2100 \\ 0.316/4\sqrt{Re_m^*} & \text{при } Re_m^* \geq 2100 \end{cases}$$

5. Рассчитываются потери давления в трубе:

$$\Delta P_m = \lambda \frac{L}{d_g} \frac{\rho v_{cp}^2}{2} \cdot 10^{-6}, \text{ МПа}$$

Вычисляются параметры в затрубном пространстве

6. Определяется средняя скорость потока:

$$v_{cp} = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d_n^2)}, \text{ м/с}$$

7. Вычисляется параметр Сен-Венана для кольцевого канала:

$$Sen_\kappa^* = \frac{\tau_0(D - d_n)}{\eta v_{cp}}$$

8. Вычисляется обобщенный параметр Рейнольдса:

$$Re_\kappa^* = \frac{\rho v_{cp} (D - d_n)}{\eta \left(1 + \frac{1}{8} Sen_\kappa^*\right)}$$

Таблица 1 – Варианты заданий к практической работе №1

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
плотность ρ , кг/м ³	1500	1350	1400	1250	1550	1600	1450	1300	1380	1520
динамическое напряжение сдвига τ_0 , Па	4	3	2	4	5	6	3	5	6	5
пластическая вязкость η , Па · с	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.05	0.02	0.09	0.01
подача насосов, Q , м ³ /с	0.03	0.04	0.06	0.035	0.045	0.055	0.042	0.035	0.038	0.043
диаметр скважины D , м	0.214	0.216	0.218	0.220	0.216	0.214	0.216	0.218	0.222	0.224
БТ наружный/внутренний диаметр, длина $d_{н1}/d_{в1}, L_1$, м	0.140/ 0.121 3000	0.142/ 0.120 2800	0.144/ 0.122 2850	0.146/ 0.124 2900	0.148/ 0.126 2950	0.142/ 0.121 2960	0.148/ 0.123 2930	0.146/ 0.125 2870	0.144/ 0.126 2830	0.140/ 0.120 2890
УБТ наружный/внутренний диаметр, длина $d_{н2}/d_{в2}, L_2$, м	0.178/ 0.08 70	0.180/ 0.1 72	0.182/ 0.12 74	0.184/ 0.14 76	0.186/ 0.16 78	0.178/ 0.06 68	0.180/ 0.08 64	0.178/ 0.1 62	0.178/ 0.06 60	0.184/ 0.08 66

9. В зависимости от режима течения определяется коэффициент сопротивления:

$$\lambda = \begin{cases} 96/\text{Re}_k^* & \text{при } \text{Re}_k^* < 1600 \\ 0.316/\sqrt[4]{\text{Re}_k^*} & \text{при } \text{Re}_k^* \geq 1600 \end{cases}$$

10. Потери давления в затрубном пространстве:

$$\Delta P_\kappa = \lambda \frac{L}{(D - d_n)} \frac{\rho v_{cp}^2}{2} \cdot 10^{-6}, \text{ МПа}$$

11. Определяются суммарные гидравлические потери:

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_\kappa, \text{ МПа}$$

12. Строится график потерь давления при движении бурового раствора по участкам (см. рисунок 2).

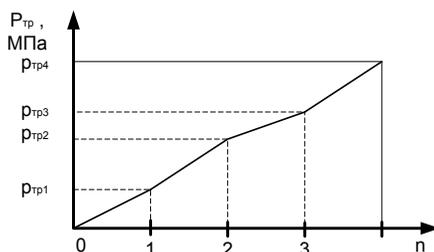


Рисунок 2 – Потери давления при движении бурового раствора по участкам

13. Формулируется вывод по задаче

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое обобщённый параметр Рейнольдса?
2. Что определяет параметр Сен-Венана?
3. Какие режимы течения вы знаете? Напишите их критериальные уравнения?
4. Какие существуют виды гидравлических потерь?
5. Какие параметры в большей степени оказывают влияние на значение потерь давления при движении бурового раствора?

Практическая работа №2. Определение забойного давления при спуске (подъёме) колонны труб

Из практики замечено, что в сложных геолого-технических условиях неверный выбор скорости спуска или подъёма колонны труб в скважине может быть причиной серьёзных осложнений. От грамотного выбора скорости спуска (подъёма) колонны труб зависит изменение величины забойного давления, а значит и соблюдение технологического процесса.

Задание

Произвести расчёт забойного давления при равномерном спуске (подъёме) колонны труб в скважине с буровым раствором. Рассмотреть варианты спуска и подъёма труб с открытым и закрытым низом. Определить силу сопротивления движению колонны. Варианты заданий приведены в таблице 2.

Рекомендации к решению работы № 2

1. Вычисляется параметр Хедстрема:

$$He_{\kappa} = \frac{\tau_0 \rho (D - d_n)^2}{\eta^2}$$

2. Определяется критическая (максимальная) скорость спуска (подъёма) колоны:

$$V_{кр} = \frac{800\eta D(D + d_n)}{\rho d_n^3} \left(1 + \sqrt{1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot He_{\kappa}}\right), \text{ м/с};$$

для дальнейших расчётов принимается $V < V_{кр}$.

3. Определяются безразмерные радиусы ядер потока:

$$\alpha = d_n / D; \quad \omega = \sqrt{\frac{1 - \alpha^2}{2 \ln(1/\alpha)}}$$

Открытый и закрытый низ трубы учитывается через α_0 :

$\alpha_0 = 0$ - низ закрыт; $\alpha_0 = 1$ - низ открыт.

Таблица 2 – Варианты заданий к практическим работам №2 и №3

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
длина колонны L , м	3000	3020	3030	3035	3010	3050	3060	3070	3080	3090
наружный/ внутренний диаметр d_n/d_g , м	0.157/ 0.136	0.130/ 0.100	0.130/ 0.106	0.170/ 0.150	0.140/ 0.115	0.155/ 0.134	0.153/ 0.130	0.162/ 0.148	0.145/ 0.127	0.165/ 0.145
плотность ρ , кг/м ³	1600	1350	1400	1250	1550	1600	1450	1300	1380	1520
динамическое напряжение сдвига τ_0 , Па	7.3	7.4	7.2	7.0	6.8	6.9	7.1	7.5	7.6	6.5
пластическая вязкость η , Па · с	0.035	0.040	0.025	0.036	0.037	0.028	0.039	0.042	0.041	0.040
диаметр скважины D , м	0.222	0.220	0.218	0.220	0.234	0.223	0.240	0.219	0.235	0.226
Дополнительные данные для решения задачи №3										
допустимое изменение забойного давления $\Delta P_{дон}$, МПа	3.0	2.0	4.0	3.5	3.1	2.5	3.6	3.7	3.8	2.9

4. Определяются значения коэффициентов a и b :

$$a = \frac{\omega^2}{(1 - \alpha^2)(1 + \alpha^2 - 2\omega) + \alpha_0^4};$$

$$b = \frac{1 + \alpha^3 - 2\omega + \alpha_0^3}{(1 - \alpha^2)(1 + \alpha^2 - 2\omega) + \alpha_0^4}$$

5. Вычисляется величина изменения забойного давления для спуска (подъёма) колонны труб:

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{(D/2)^2} \cdot \left(aV + b \frac{\tau_0(D/2)}{3\eta} \right), \text{ Па}$$

6. Сила сопротивления движению колонны определится как:

$$F = \frac{\pi}{8 \ln(D/d_n)} \cdot (\Delta P(D^2 - d_n^2) + 16\eta LV), \text{ Н}$$

7. Сравниваются расчетные значения изменения забойного давления и сил сопротивления для открытого низа со значениями, полученными для закрытого низа.

8. Формулируется вывод по задаче.

Вопросы для самоконтроля

1. Что определяет параметр Хедстрема?
2. Как учитывается открытый и закрытый низ труб?
3. Почему сила сопротивления движению колонны труб при закрытом низе больше?

Практическая работа №3. Определение допустимой скорости спуска (подъёма) колонны труб

В процессе бурения скважины важно обеспечить минимальное изменение забойного давления, так как его значительное изменение может привести к внештатным ситуациям и поломке оборудования. Допускаемое изменение забойного давления для каждой скважины определяется на основании: глубины и диаметра, типа горных пород и возможностей оборудования. Обеспечить минимальное изменение забойного давления возможно при соблюдении определённой скорости спуска (подъёма) колонны труб.

Задание

По условию задачи №2 определить допустимую скорость спуска и подъёма колонны труб с закрытым низом в скважине при ламинарном и турбулентном режиме вытеснения бурового раствора. Варианты заданий приведены в таблице 2.

Рекомендации к решению работы № 3

1. Определяются параметры He_k и α в соответствии с пунктами 1, 3 задачи №2. При спуске буровой колонны с закрытым низом $\alpha_0 = 0$.
2. Критическое значение давления, характеризующее режим вытеснения определится:

$$\Delta P_{кр} = \frac{\eta^2 L}{\rho D^3 (1-\alpha)^3} \cdot \left[\frac{2(1-\alpha^2)10^4}{\alpha^2 \ln(1/\alpha)} \left(1 + \sqrt{3 \cdot 10^{-4} \cdot He_k} \right) + 8 \cdot He_k \right], \text{ Па}$$

3. Определяется число Рейнольдса:

$$Re_k = \frac{\rho \cdot V \cdot D \cdot (1-\alpha)}{\eta}$$

где V – скорость течения бурового раствора, принимается равной скорости спуска (подъёма) колонны из задачи №2.

4. Определяются коэффициенты гидравлического сопротивления при турбулентном режиме течения для гладкого и шероховатого каналов:

$$\text{гладкий: } \frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = 2 \lg \left(\frac{\sqrt{\lambda_r} \operatorname{Re}_k}{1 + \sqrt{\alpha}} \right) - 0.8a;$$

$$\text{шероховатый: } \lambda_{III} = \left(2 \lg \frac{(1 - \sqrt{\alpha})R}{s_0} + 0.88 \frac{\sqrt{\alpha}}{1 + \alpha} + 1.74 \right)^{-2}$$

где: $a = 1 - 1.1\sqrt{\alpha}/(1 + \alpha)$; $s_0 = (1 \div 5) \cdot 10^{-3}$ - высота элементов шероховатости, м.

5. Вытеснение бурового раствора может происходить при ламинарном режиме течения, если $\Delta P_{дон} < \Delta P_{кр}$, тогда максимальная скорость определится как:

$$V_{дон1} = \frac{(D - d_n)^2 \ln(D/d_n)}{24\eta L} \left(\Delta P_{дон} - \frac{8\tau_0 L}{D - d_n} \right), \text{ м/с}$$

Если же $\Delta P_{дон} > \Delta P_{кр}$, то вытеснение бурового раствора происходит при турбулентном режиме, при этом:

$$V_{дон2} = \frac{(D - d_n)^2}{D d_n} \sqrt{\frac{2(D - d_n)}{\lambda_{r(III)} \cdot \rho L} \Delta P_{дон}}, \text{ м/с}$$

6. Если режим турбулентный, то сравниваются значения скоростей спуска колонны гладких и шероховатых труб.
7. Формулируется вывод по задаче.

Вопросы для самоконтроля

1. По какому условию в задаче определяется режим течения и максимальная скорость спуска (подъёма) колонны труб?
2. Почему не следует принимать скорость спуска (подъёма) колонны труб больше максимальной?
3. Почему скорость спуска (подъёма) колонны гладких труб больше чем шероховатых?

Практическая работа №4. Определение плотности бурового раствора

В процессе промывки скважины важно сохранить устойчивость и целостность стенок в течение времени процесса. Это можно обеспечить буровым раствором с определённым значением плотности.

Задание

Основываясь на упругой модели горной породы, определить минимальную плотность бурового раствора, обеспечивающую устойчивость стенки скважины в течении заданного периода времени T , с. Варианты заданий приведены в таблице 3.

Рекомендации к решению работы № 4

1. Определяются приведённое значение плотности бурового раствора и приведённое давление на стенки скважины:

$$\bar{\rho}_z = \rho_z \cdot 10^{-3};$$
$$\Delta p = Hg(\bar{\rho}_z - k_a) \cdot 10^{-3}$$

2. Выбираются значения экспериментально определённых A и n коэффициентов согласно приложению 1.
3. Согласно критерию длительной прочности, вычисляется время до начала разрушения:

$$t_0 = \frac{1}{A(n+1)\Delta p^n}, \text{ с}$$

4. Определяется отношение времени, технологически необходимого и времени до начала разрушения:

$$T/t_0 \quad .$$

Таблица №3 – Варианты заданий к практической работе №4

Исходные данные	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глубина скважины H , м	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600	3700	3800	3900
Коэффициент аномального порового давления k_a	1.2	1.3	1.25	1.35	1.4	1.45	1.5	1.22	1.55	1.6
Средняя плотность пород ρ_z , кг/м ³	2500	2550	2450	2480	2540	2520	2600	2570	2580	2460
Заданный период времени $T, 10^5$ с	6.4	6.0	6.5	6.2	6.3	6.7	6.9	7.0	7.2	5.8

По полученному значению согласно приложению 1 выбирается значение величины приведённого давления в скважине q_{\min} . Если значение q_{\min} попадает в диапазон величин T/t_0 , то истинное значение q_{\min} определить путём интерполяции.

5. Допустимая плотность бурового раствора определяется по уравнению:

$$\rho_c = [k_a + q_{\min} (\bar{\rho}_e - k_a)] \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3.$$

6. Формулируется вывод по задаче.

Вопросы для самоконтроля

1. Зачем необходим расчёт допустимой плотности бурового раствора?
2. Что произойдёт, если производить промывку буровым раствором с значением плотности меньше допускаемого?
3. Как влияет глубина скважины на величину допускаемой плотности бурового раствора?
4. Какова суть метода интерполяции-экстраполяции?

Список рекомендуемой литературы

1. Рабинович, Н. Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении / Н. Р. Рабинович. – М. : Недра, 1989. – 270 с.

Литература находится в свободном доступе на сервере в компьютерных аудиториях кафедры "Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений".

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Характер сужения допустимого интервала по времени при коэффициенте бокового горного давления $\delta = 0.5$; показателе трещинообразования $n = 2$ и коэффициенте $A = 4.5 \cdot 10^{-10}$ МПа/с

T/t_0	0	0.2	0.6	1	1.4	2	3	5	10
q_{\min}	-0.5	-0.29	-0.1	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.32

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Структура отчёта

1. Титульный лист

Министерство образования и науки РФ
ФГОУ ВПО "Удмуртский государственный университет"
Институт нефти и газа им. М.С. Гусериева
Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

Отчёт по практической работе №1
по дисциплине «Механика сплошной среды»
вариант № 5

Проверил: С.С. Макаров
к.т.н., доцент

Выполнил: И.И. Иванов
студент, гр. ОБ-131012-11

Ижевск 2014

2. Условие задания и исходные данные

Задание

Найти величину суммарных гидравлических потерь при установившейся циркуляции бурового раствора по трубам и в затрубном пространстве скважины. компоновка буровой колонны состоит из утяжеленных буровых труб (УБТ) и буровых труб (БТ).

Исходные данные

Плотность бурового раствора	$\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$
Динамическое напряжение сдвига	$\tau = 4 \text{ Па}$
Пластическая вязкость	$\eta = 0,03 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Подача насосов	$Q = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$
Диаметр скважины	$D = 0,214 \text{ м}$
Наружный диаметр БТ	$d_{н1} = 0,14 \text{ м}$
Внутренний диаметр БТ	$d_{в1} = 0,121 \text{ м}$
Длина БТ	$L1 = 3000 \text{ м}$
Наружный диаметр УБТ	$d_{н2} = 0,178 \text{ м}$
Внутренний диаметр УБТ	$d_{в2} = 0,08 \text{ м}$
Длина УБТ	$L2 = 70 \text{ м}$

3. Рисунки и расчётные схемы к задаче (если они нужны) оформленные по ГОСТ 2.105 - 95.

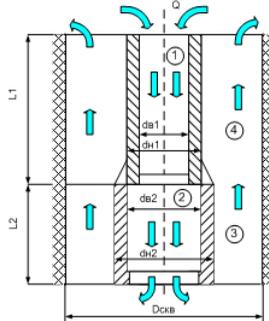


Рисунок 1 – Схема движения бурового раствора в скважине

4. Расчётная часть (с необходимыми графиками по результатам расчёта оформленными по ГОСТ 2.105 - 95)

Последовательно определяются параметры в трубах

1. Определяется средняя скорость потока:

$$V1 := \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (dn1)^2} \quad V1 = 2.274 \text{ м/с}$$

$$V2 := \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (dn2)^2} \quad V2 = 2.898 \text{ м/с}$$

10. Рассчитываются потери давления в затрубном пространстве:

$$\Delta P1z := \lambda1z \cdot \frac{L1}{D - dn1} \cdot \frac{\rho \cdot V1z^2}{2} \cdot 10^{-6} \quad \Delta P1z = 0.379 \text{ МПа}$$

$$\Delta P2z := \lambda2z \cdot \frac{L2}{D - dn2} \cdot \frac{\rho \cdot V2z^2}{2} \cdot 10^{-6} \quad \Delta P2z = 3.197 \text{ МПа}$$

В ходе выполнения практической работы №1 определены потери давления по участкам колонны труб при течении бурового раствора в трубном и затрубном пространствах. Значения потерь давления для 4-х участков составляют: $\Delta P1 = 4,56 \text{ МПа}$, $\Delta P2 = 0,1 \text{ МПа}$, $\Delta P3 = 3,2 \text{ МПа}$, $\Delta P4 = 0,38 \text{ МПа}$

5. Вывод по задаче

Вывод

Путевые потери на участках 1 и 3 получились на порядок больше, чем на участках 2 и 4, так как длина БТ в 40 раз больше длины УБТ. Путевые потери давления в первую очередь зависят от скорости течения и длины участков. По известному значению суммарных гидравлических потерь $\Delta P = 8,24 \text{ МПа}$ возможно подобрать насосное оборудование для промывки скважины.

Учебное издание

Сергей Сергеевич Макаров

Константин Эдуардович Чекмышев

**Методические указания
к выполнению практических работ
по дисциплине «Механика сплошной среды»**

Авторская редакция

Подписано в печать 26.12.2014. Формат 60×48 $\frac{1}{6}$.

Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л.1,4.

Тираж 30 экз. Заказ № 0000.

Изд-во «Удмуртский университет»
42603, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 4, каб. 207
Тел. (3412) 500-295