Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ПРОЕКТ «ИНЖЕНЕРНЫЙ КЛАСС В МОСКОВСКОЙ ШКОЛЕ»

Решение ситуационных задач по конструкторскому направлению

Авторы

Буркова Е.Г., Козичев В.В., Леонов В.В.

Конструкторское направление



Включает задачи, направленные на определение параметров исследуемой системы или характеристик конструктивного решения, отвечающих условиям эксплуатации или обеспечивающих рациональное решение поставленной задачи. Например, запаса рабочего вещества на борту аппарата

Основные критерии оценивания решения задач



- 1. Выделение основных физических процессов, их последовательности и причинно-следственных связей. Данный пункт подразумевает оценку текстового и графического описания физических процессов.
- 2. Правильная формализация физических процессов, запись основных зависимостей (формул), описывающих физические процессы или состояния элементов системы. В качестве исходных формул необходимо использовать законы и определения физических величин, общие известные уравнения процессов и состояний.
- 3. Составление системы уравнений, алгоритма расчета, математической модели. Здесь корректная запись системы является приоритетной относительно упрощения и приведения к удобному виду. Оценивается умение комбинировать и преобразовывать выражения, с целью получения нужных данных.
- **4.** Проведение расчетов, получение и представление результата. Оценивание каждого вопроса задачи производится отдельно с весовым коэффициентом, равным (1/[количество вопросов]), а также добавляется бонусный балл за качество оформления или представления ответа.

Дополнительные критерии оценивания решения задач по конструкторскому направлению



- 1. До 5 бонусных баллов за учет дополнительных условий технической системы или процесса, не заложенных в стандартное решение и позволяющих получить более точный ответ;
- 2. До 1 бонусного балла за дополнительный анализ полученного результата (определение условий применимости тех или иных конструкторских решений, конструкторские предложения, позволяющие улучшить параметры системы и т.п.).

Дополнительные критерии оценивания решения задач



- 1. Если решение задачи содержит разрозненные записи, выделены правильно некоторые физические процессы, присутствует одна-две правильные формулы, но решение, как таковое отсутствует или абсолютно неверное, то ставится 1-2 балла
- 2. Верные решения задач могут отличаться от авторских. Допустим учет дополнительных параметров, не предусмотренных авторами в случае, если не нарушаются физические законы и технические закономерности функционирования системы.
- 3. За отсутствие пояснений, ошибки в численных расчетах при верном пути решения задачи снимается 1-2 балла.
- 4. В случае если задача содержит правильный путь решения, но не доведена до ответа или получен неправильный ответ, при этом присутствуют отдельные правильные элементы решения, то оценивание проводится по критериям, приведенным для каждой задачи.

Критерии оценивания решения задач



1. Выделение физических процессов, последовательности и причинно-следственных связей				
Основные баллы	9			
Графическое описание	+3			
Структурирование	+2			
Максимальное число баллов за этап	14			
2. Формализация физических процессов				
Основные баллы	8			
Максимальное число баллов за этап	8			
3. Подготовка системы уравнений, алгоритма, математической модели				
Основные баллы	8			
Преобразование системы уравнений	+2			
Максимальное число баллов за этап	10			
4. Проведение расчетов, получение и представление результата				
Расчеты и результат	9			
Представление результата	+3			
Максимальное число баллов за этап	12			
5. Дополнительные баллы в соответствии со спецификой задачи				
Максимальное число баллов за этап	6			
Общее количество баллов				
Максимальная сумма баллов за задачу	50			

Общий алгоритм решения задач



- 1. Выделить (назвать) основные физические процессы и явления, лежащие в основе работы и/или оказывающие влияние на работу описанных в поставленной задаче технических объектов, а также установить их последовательность и причинно-следственные связи.
- 2. Привести, при необходимости, графическое (схематическое) описание поставленной задачи.
- 3. Формализовать задачу, т.е. сформулировать вводимые при решении задачи допущения, привести необходимые для её решения базовые физические соотношения (формулы).
- 4. Определить есть ли необходимость в дополнительных исходных или справочных данных.
- 5. Составить систему уравнений (математическую модель), решить её, получить аналитические соотношения для искомых величин.
- 6. Произвести числовые расчеты, проверив соответствие единиц измерения физических величин.
- 7. Представить полученные результаты в соответствии с вопросами задачи.

Регламент



- 1. В билете 1 задача, содержащая 2... вопроса.
- 2. Время на решение задачи: 80 минут.
- 3. Время на защиту: 5 минут (включая ответы на вопросы).
- 4. Максимально количество баллов:

50 баллов (Решение) + 10 баллов (Защита) = 60 баллов.

5. Без защиты работа не засчитывается.

Задача 1. Условие



Акустический буй, сбрасываемый с самолета, состоит из двух частей — блока приборов объемом 1 л, массой 2 кг и гермокапсулы с воздухом объемом 2 л и массой 0,1 кг. Форма буя обеспечивает отсутствие сопротивления при движении в воде. По достижении давления 2 атм капсула разрушается и выпускает воздух. Буй сбрасывают с высоты 20 м без начальной скорости.

- 1) Найти скорость в момент входа в воду и начальное ускорение в воде.
- 2) Какова высота сброса, выше которой буй в итоге утонет, а ниже которой всплывёт?

Задача 1. Решение



1) Скорость снаряда при входе в воду определяется начальной высотой свободного падения. Проще всего посчитать через перевод потенциальной энергии в кинетическую

$$mgH = \frac{mv^2}{2},$$

откуда

$$v = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 20} = 19.8 \text{ m/c}.$$

Ускорение в воде определяется массой снаряда и действующими на него силами – тяжести и Архимеда

$$a = \frac{-F_T + F_A}{m} = \frac{-mg + \rho_{H_2O}Vg}{m} = \frac{-2,1 \cdot 9,8 + 1000 \cdot 0,003 \cdot 9,8}{2,1} = 4,2 \text{ m/c}^2.$$



Поскольку параметры плавучести не меняются, движение в воде будет равнозамедленным. При этом буй достигнет глубины

$$h = \frac{v^2}{2a} = \frac{gH}{a} = 46,67 \text{ M}.$$

Гермокапсула выдерживает давление 2 атм (то есть избыточное давление 1 атм), что соответствует глубине погружения около 10 м. Значит капсула разрушится, плавучесть снаряда станет отрицательной и он опустится на дно.

2) Высота сброса определяется начальной скоростью снаряда. Если снаряд не достигнет глубины $10\,$ м, капсула останется цела и снаряд всплывет. Подставив, $h=h_{max}\,$ в последнюю формулу, найдем из нее предельно допустимую высоту сброса:

$$H_{\text{max}} = \frac{ah_{\text{max}}}{g} = 4,3 \text{ M}$$

Задача 2. Условие



Подводный аппарат состоит из герметичного обитаемого отсека объемом 20 м³. В отсеке размещены баллоны со сжатым газом под избыточным давлением 10 атм (10⁶ Па). Также имеется балластная цистерна (20 м³), соединенная с окружающей средой (напрямую) и с баллонами, наполненными газом (через управляемый экипажем вентиль).

Масса пустого корабля составляет 30000 кг.

Заполнение балластной цистерны осуществляется путем стравливания за борт находящегося в ней газа и одновременного заполнения её забортной водой.

По мере заполнения балластной цистерны водой в определенный момент достигается нейтральная плавучесть, после чего корабль начинает погружаться.

Задача 2. Условие (продолжение)



Вопросы:

- 1) При каком объеме забортной воды в балластной цистерне достигается нейтральная плавучесть на нулевой глубине?
- 2) До какой глубины возможно вытеснение воды запасенным в баллонах сжатым газом?
- 3) Какая масса газа должна быть запасена в баллонах для обеспечения однократного всплытия с глубины 80 м при исходной нейтральной плавучести.

Дополнительная информация:

Рабочий вытесняющий газ — азот. Молекулярная масса 28. Температура вытесняющего газа 300 К.

Задача 2. Решение



В данном случае последовательность анализа физики соответствует очередности вопросов. При этом формализация и расчеты проводятся по ходу разбора физики, а не отдельным этапом.

Нейтральная плавучесть достигается при равенстве силы тяжести корабля и силы Архимеда, действующей на газовый объем полностью погруженного корабля.

Сила тяжести корабля:

$$F_{\text{\tiny T}} = Mg = 30000 \cdot 9,81 = 294300 \,\text{H}$$

Сила Архимеда:

$$F_A = V \rho g$$

где V — объёмов отсеков корабля, заполненных воздухом, а $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность вытесняемой кораблём воды.

Приравняв правые части, найдём объём воздуха в лодке, необходимый для обеспечения нейтральной плавучести:

$$V = \frac{Mg}{\rho g} = \frac{M}{\rho} = \frac{30000}{1000} = 30 \,\mathrm{m}^2$$



Вычитая этот объём из общего объёма корабля, определим объём принятой воды, необходимый для достижения нейтральной плавучести:

$$V_{\text{волы}} = 40 \,\text{m}^3 - 30 \,\text{m}^3 = 10 \,\text{m}^3$$

2) Вытеснение балластной воды возможно в том случае, если давление в баллонах с газом больше давления окружающей среды.

Как известно, высота столба жидкости оказывает давление, равное $p = \rho g h$. Выразим из данного уравнения глубину (высоту столба жидкости) и подставим в качестве давления величину давления в баллонах:

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{10^6}{9.81 \cdot 10^3} = 101,93 \text{ M}$$

Ниже этой глубины при открытии вентилей вода начнет заполнять и ёмкости сжатого газа.

3) Давление газа в цистерне на глубине h=80 м должно обеспечивать объем газа, соответствующий нейтральной плавучести. Как показано выше, последний составляет половину объема цистерны: $V_{\pi\pi}=10~{\rm M}^3$.

15



Тогда, согласно уравнению Менделеева-Клапейрона имеем:

$$(\rho gh + p_{\text{atm}})V_{\text{пл}} = \frac{mR_0T}{\mu}$$

Для простоты примем ситуацию, при которой для погружения был стравлен весь воздух из балластной цистерны, и объём газа необходимо восстановить с нуля.

Выразив из последнего соотношения массу газа, получим:

$$m = \frac{\mu(\rho g h + p_{\text{atm}}) \cdot V_{\text{fij}}}{R_0 T} = \frac{28 \cdot 10^{-3} \left(1000 \cdot 9, 8 \cdot 80 + 100000\right) \cdot 10}{8,314 \cdot 300} = 99,33 \text{ kg}$$

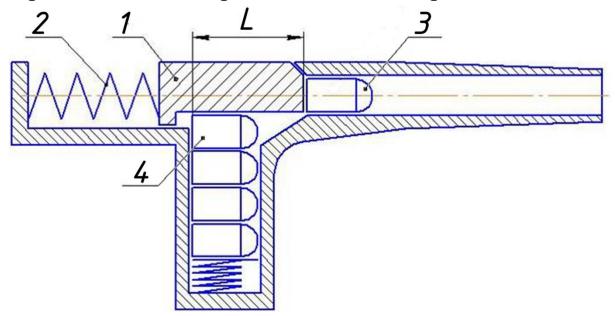
Как видно, в данном случае мы исходили из допущения, что процесс расширения из баллона является изотермическим (технически это осуществимо различными способами, от нагрева бортовым источником до пропускания через теплообменник с забортной водой).

Данное (несколько упрощенное) решение является базовым, позволяющим вплотную приблизиться к максимальной оценке за задачу.

Задача 3. Условие



Стрелковые системы со свободным затвором работают за счет энергии выстрела. При выстреле за счет закона сохранения импульса затвору 1 придается скорость, направленная в противоположную направлению вылета снаряда (пули) 3 сторону. Сдвигаясь по инерции назад, затвор сжимает возвратную пружину 2, переводя в её потенциальную энергию свой запас кинетической энергии. Достигнув задней точки, под действием сжатой пружины 2 затвор 1 движется вперед, досылая в патронник новый патрон 4.



Задача 3. Условие (продолжение)



Масса вылетающего снаряда (пули) 3 составляет 0,01 кг. Масса затвора 1 0,25 кг. Дистанция подхвата патрона 4 затвором L=0,08 м. Полная дистанция отката затвора X=0,12 м. Масса досылаемого патрона 0,03 кг. В начальный момент времени пружина 2 полностью расслаблена. Начальная скорость снаряда 300 м/с.

Вопрос:

- 1) определите начальную скорость движения затвора.
- 2) определите потребную жесткость возвратной пружины, обеспечивающей указанную выше дистанцию отката затвора.
- 3) определите скорость досылания патрона в патронник, если после захвата снаряда затвором они движутся как единое целое (абсолютно неупругий удар).

Потерями энергии – пренебречь. Пружину считать невесомой. В начальном положении пружина не деформирована.

Задача 3. Решение



1) Начальная скорость движения затвора оценивается с помощью закона сохранения импульса:

$$m \cdot u + M \cdot U = 0$$

$$U = -\frac{m \cdot u}{M} = -\frac{0.01 \cdot 300}{0.25} = -12 \text{ m/c}.$$

Знак «-» здесь показывает направление движения затвора — против направления движения пули.

2) При откате затвора пружина сжимается, запасая в виде потенциальной энергии сжатой пружины кинетическую энергию затвора. Таким образом, без учета потерь можно записать уравнение закона сохранения энергии:

$$\frac{M \cdot U^2}{2} = \frac{k \cdot X^2}{2}$$

откуда жесткость пружины равна:

$$k = \frac{M \cdot U^2}{X^2} = \frac{0.25 \cdot 12^2}{0.12^2} = 2500$$
 H/m.

3) Для оценки скорости досылания патрона (скорость связки патрон-затвор в момент возврата затвора в крайнее переднее положение) необходимо определить параметры движения на двух участках: от крайней задней точки до подхвата патрона, и от подхвата патрона до крайней передней точки.

Скорость движения затвора к моменту подхвата патрона определяется степенью обратного преобразования энергии — от энергии сжатой пружины к кинетической энергии движущегося затвора. Запас потенциальной энергии соответствует степени сжатия пружины. Для трех характерных точек (при движении затвора назад) он составляет:

	Задняя точка $X = 0,12 \text{ м}$	Точка подхвата $X = 0.08 \text{ м}$	Передняя точка $X = 0.00 \text{ м}$
$E_{\kappa} = (M \cdot U^2)/2$, Дж	0	10	18
$E_{\rm p} = (k \cdot x^2)/2$, Дж	18	8	0
<i>U</i> , м/с	0	8,9	12

Так же в таблице приведена скорость движения затвора.



Скорость затвора после подхвата патрона определяется с помощью закона сохранения импульса:

$$M \cdot U = (M + m) \cdot W,$$

$$W = \frac{M \cdot U}{(M + m)} = \frac{0.25 \cdot 8.9}{(0.25 + 0.03)} = 7.95 \text{ m/c}$$

При этом, после подхвата снаряда системе затвор-патрон сообщается энергия, остающаяся запасенной в сжатой пружине:

$$\frac{(M+m)\cdot W^2}{2} + Ep = \frac{(M+m)\cdot w^2}{2},$$

откуда

$$w = \sqrt{W^2 + \frac{2 \cdot Ep}{(M+m)}} = \sqrt{7.95^2 + \frac{2 \cdot 8}{0.28}} = 10.97 \text{ m/c}.$$

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Задача 3. Условие



Для изготовления стеклопластиковых труб проводится намотка на оправку (форму) ткани из тонких стеклянных нитей, пропитанной связующим (жидкий материал, превращающийся в пластмассу под воздействием физических или химических факторов). После этого проводится отверждение связующего. В качестве связующего используется двухкомпонентный состав, состоящий из двух объемных долей эпоксидной смолы и одной объемной доли отвердителя.

Плотность обоих компонентов составляет 1200 кг/м 3 . Стеклянная ткань (плотность материала 2500 кг/м 3) имеет толщину 0,2 мм, а нити занимают 20% её объема.

Для подготовки пропитанной ткани компоненты связующего из двух емкостей под давлением подаются в смеситель, после чего в пропиточную ванну, где происходит пропитка ткани и отжим избыточного связующего перед намоткой.

Задача 3. Условие (продолжение)



Вопросы:

- 1) Каков необходимый расход компонентов связующего (в кг/с) для производства стеклопластиковой трубы средним диаметром 100 мм с толщиной стенки 2 мм, если производительность завода составляет 100 м/час.
- 2) Определите диаметры отверстий для подачи смолы и отвердителя, если избыточное давление подачи составляет 2 атм.
- 3) Определите массу 1 метра трубы.

Дополнительные сведения: объёмный расход жидкости через отверстие в первом приближении может быть определён по формуле

$$Q = S\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \text{ m}^3/\text{c}$$

где S- площадь сечения отверстия, $\Delta p-$ избыточное давление в ёмкости с жидкостью, $\rho-$ плотность жидкости.

24

Задача 3. Решение



Выделение физических процессов:

Прежде всего, указанные материалы расходуются на формирование трубы – то есть заполнение объема её стенки. Зная поперечные размеры трубы можно определить площадь сечения (и объем материала, расходуемый на изготовление 1 метра трубы).

Зная производительность завода (в погонных метрах трубы за единицу времени) и площадь сечения трубы — можно определить суммарный объемный расход материала. Зная объемные доли компонентов (ткани и связующего) можно определить их объемные расходы, а зная их плотности — и массовые расходы.

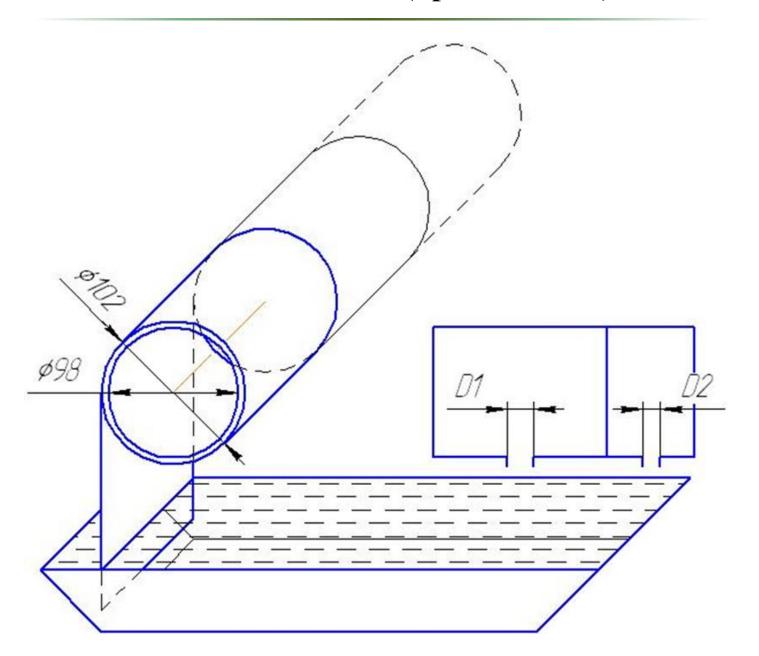
Зная толщину стенки и толщину стеклянной ткани (условно несжимаемой) можно определить количество слоев в трубе и, следовательно, необходимую площадь ткани для изготовления 1 п.м. трубы. А зная производительность завода — общий расход в м²/с.

25



- Расход ткани и массовые расходы компонентов связующего являются ответом на вопрос №1.
- Из формулы для объемного расхода жидкости, зная плотность материалов и избыточное давление подачи, можно определить площади (а значит и диаметры) отверстий, что является ответом на вопрос №2.
- Стеклянная ткань является несжимаемой, но слои ложатся один на другой без зазора. То есть в намотанной на оправку ткани 20% объема занимает стекло, а остальные 80% объема связующее. Исходя из плотностей материалов, можно найти массу 1 п.м. трубы, что является ответом на вопрос №3.







Формализация физических процессов и подготовка системы уравнений, фактически, в данном примере свернуты в один пункт, ввиду отсутствия жесткой последовательности расчетов:

Площадь сечения материала трубы составляет:

$$S = \pi (D^2 - d^2) / 4$$

где D и d — внешний и внутренний диаметры трубы соответственно.

Объемный расход материала трубы составляет

$$V = S \frac{L}{T},$$

где L/T = 100 п.м/час — производительность завода. Для приведения параметров к системе СИ разделим объемный расход на количество секунд в часе:

$$V_s = \frac{SL}{3600}, \text{ m}^3/\text{c}$$



Объем l=1 п.м трубы составляет $V_1=S\cdot l$.

Известно, что нити занимают 20% объема ткани, а значит и намотанного материала. Определим потребные объемные расходы компонентов:

$$V_{ ext{mканu}} = 0, 2V_{s},$$
 $V_{ ext{cmoлы}} = rac{2}{3} (1 - 0, 2) V_{s},$ $V_{ ext{otsepдителя}} = rac{1}{3 (1 - 0, 2) V_{s}}.$

Массовый расход ткани определяется объемным расходом материала и его плотностью

$$M_{\text{ткани}} = V_{\text{ткани}} \rho_{\text{стекла}}$$

Массовые расходы смолы и отвердителя, соответственно:

$$M_{\text{смолы}} = V_{\text{смолы}} \rho_{\text{смолы}},$$

$$M_{\text{\tiny OTB}} = V_{\text{\tiny OTB}} \rho_{\text{\tiny OTB}}.$$



Количество слоев в ткани составляет

$$n = \frac{D - d}{2h}.$$

Здесь (D - d)/2 — толщина одной стенки, h — толщина слоя ткани.

Приняв средний диаметр трубы за диаметр намотки, определим длину ткани для намотки полной толщины:

$$X = \pi D_{mid} n$$
.

Площадь отверстий выражается из формулы для расхода жидкости

$$Q\sqrt{\frac{\rho}{2\cdot\Delta p}} = S = \frac{\pi\cdot D_1^2}{4}$$

Отсюда диаметр:

$$\sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi} \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}}} = D_1$$



Проведение расчетов:

1) Расход ткани

$$M_{_{ ext{ТКАНИ}}} = V_{_{ ext{ТКАНИ}}}
ho_{_{ ext{СТЕКЛА}}},$$
 $V_{_{ ext{МКАНИ}}} = 0, 2V_{_S},$ $V_{_S} = rac{SL}{3600},$ $S = rac{\pi(D^2 - d^2)}{4},$

$$M_{_{\text{ТКАНИ}}} = 0,2\pi \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \frac{L}{3600} \rho_{_{\text{СТЕКЛА}}} = 0,2\pi \frac{0,102^2 - 0,098^2}{4} \cdot \frac{100}{3600} \cdot 2500 = 0,00872 \text{ KG/C}$$

$$M_{
m cmoлы} = V_{
m cmoлы}
ho_{
m cmoлы},$$

$$V_{\text{смолы}} = \frac{2}{3} (1 - 0, 2) V_{s},$$



$$M_{\text{смолы}} = \frac{2}{3} (1 - 0.2) \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \frac{L}{3600} \rho_{\text{смолы}}$$

$$M_{\text{смолы}} = \frac{2}{3} (1 - 0.2) \pi \frac{0.102^2 - 0.098^2}{4} \cdot \frac{100}{3600} \cdot 1200 = 0.0167 \text{ кг/c}$$

Аналогично

$$M_{ome} = 0.00837$$

Количество слоев в ткани

$$n = \frac{D-d}{2h} = (0.102-0.098)/(2.0.0002) = 10.$$

Расход ткани на полную толщину трубы

$$X = \pi D_{mid} n = \pi \cdot 0, 1 \cdot 10 = 3, 14 \text{ п.м.}$$

Диаметр отверстия для подачи смолы

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi} \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0000139}{\pi} \sqrt{\frac{1200}{2 \cdot 200000}}} = 0,00098$$



Диаметр отверстия для подачи отвердителя, соответственно:

$$D_2 = 0,00069$$
 м.

Масса 1 метра трубы складывается из массы стеклянной ткани и массы связующего.

Масса ткани для 1 п.м. трубы составляет

$$M_{_{\mathrm{TKAHU}}} = 0,2S \cdot 1 \mathbf{M} \cdot \rho_{_{\mathrm{CTEKJIa}}} = 0,2\pi \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot 1 \mathbf{M} \cdot \rho_{_{\mathrm{CTEKJIa}}}.$$

$$M_{\text{ткани}} = 0,2\pi \frac{0,102^2 - 0,098^2}{4} \cdot 1\text{м} \cdot 2500 = 0,314 \text{ кг}$$

Масса связующего (так как плотность компонентов одинакова – рассматриваем его как один материал с плотностью 1200 кг/м³)

Итого, полная масса 1 п.м. трубы составляет 0,917 кг.



Ответ:

- 1) Необходимый расход смолы составляет 0.0167 кг/с, отвердителя 0.00837 кг/с.
- 2) Необходимый диаметр отверстий подачи смолы и отвердителя составляет 0,98 мм и 0,69 мм соответственно.
- 3) 1 метр трубы имеет массу 0,917 кг.



Подпункт	Максимальное число баллов	Оценка решения			
1. Выделение физических процессов, последовательности и причинно-следственных связей					
Основные баллы	8	8			
Графическое описание	+3	+1			
Структурирование	+2	+1			
Максимальное число баллов	13	10			
2. Формализация физических процессов					
Основные баллы	9	8			
Максимальное число баллов	9	8			
3. Подготовка системы уравнений, алгоритма, математической модели					
Основные баллы	8	8			
Математические преобразования	+2	+1			
Максимальное число баллов	10	9			
4. Проведение расчетов, получение и представление результата					
Расчеты и результат	8	8			
Представление результата	+4	+4			
Максимальное число баллов	12	12			
5. Дополнительные баллы в соответствии со спецификой задачи					
Максимальное число баллов за этап	6	0			
Σ Сумма баллов	50	39			

Спасибо за внимание!