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 технологическому направлению

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

Москва – 2018

Технологическое направление

Включает задачи, связанные с выбором параметров производственных (технологических) процессов или оборудования. Например, определение параметров обработки резаньем, потребных характеристик токарного станка, технологических условий изготовления композитных изделий и т.д.

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 технологическому направлению

1. До 3 бонусных баллов за корректный выбор и учет параметров производственного (технологического) процесса;
2. До 3 дополнительных баллов за качественный анализ факторов, влияющих на параметры и характеристики технологического процесса, предложения по оптимизации процесса.

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	8
Графическое описание	+3
Структурирование	+2
Максимальное число баллов за этап	**13**
2. Формализация физических процессов	
Основные баллы	9
Максимальное число баллов за этап	**9**
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	8
Представление результата	+4
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..3 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

Сварная труба изготавливается методом спиральной намотки стальной ленты на оправку. Оправка обеспечивает продольную подачу трубы и её вращение. Сварка обеспечивается стационарным аппаратом. Для сварки необходимо нагреть и расплавить на стыке ленты полосу металла шириной 2 мм.

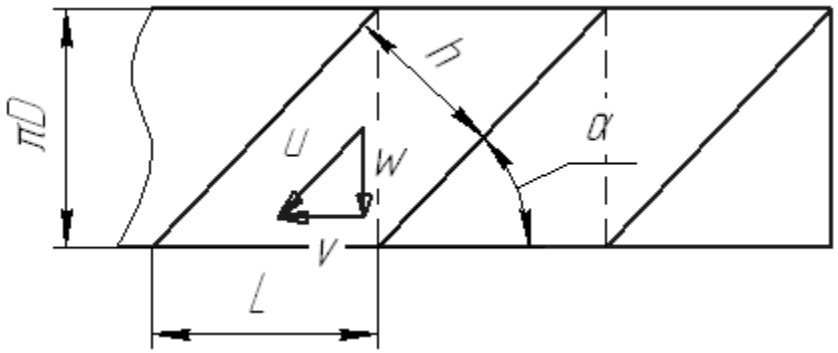
Диаметр трубы 0,2 м, ширина полосы 0,2 м, толщина металла 0,001 м, скорость выхода готовой трубы 0,1 м/с, теплоемкость стали 460 Дж/(кг·К), плотность стали 7900 кг/м^3, теплота плавления стали 84 кДж/кг.

1) Найти угол и скорость подачи ленты, а так же частоту вращения оправки.

2) Определить необходимую мощность сварочного аппарата.

Задача 1. Решение

1) Лента подается на оправку таким образом, чтобы задняя кромка ленты после оборота вокруг оправки прикасалась к переднему краю нового участка ленты, подающегося на оправку. На схеме ниже представлен раскрой трубы.



Ширина продольного раскроя равна длине окружности с диаметром трубы. В этом случае угол намотки связан с шириной ленты и диаметром наматываемой трубы. Вектор скорости подачи направлен под тем же углом, под которым подается лента. Эта скорость связана с линейной скоростью подачи трубы. Частота вращения определяется скоростью поперечного движения ленты *w* и диаметром трубы.

Задача 1. Решение (продолжение)

2) Мощность можно оценить исходя из скорости подачи стыка к аппарату и необходимой энергии для нагрева и расплавления узкой зоны металла вдоль стыка. Можно оценить энергию, необходимую для расплавления зоны сварки длиной, равной подаче шва за одну секунду. Поскольку мощность равна расходу энергии в единицу времени – полученное значение энергии численно равно мощности.

Формализация:

2.1) Из элементарной тригонометрии получаем искомый угол подачи ленты:

$$\alpha = \arccos\frac{h}{\pi D} = 71,44^{\circ}$$

Задача 1. Решение (продолжение)

Треугольник скоростей так же связан через угол подачи (а именно – скорость продольной подачи трубы и скорость подачи ленты)

$$\cos\alpha = \frac{v}{u},$$

откуда

$$u = \frac{v}{\cos\alpha} = v\frac{\pi D}{h} = 0{,}1\cdot\frac{\pi\cdot 0{,}2}{0{,}2} = 0{,}314 \text{ м/с}$$

А окружная скорость (т.е. скорость движения по окружности оправки):

$$w = v\cdot tg\alpha,$$

так же эта скорость равна произведению радиуса трубы на угловую скорость оправки

$$w = \omega\frac{D}{2}$$

Задача 1. Решение (продолжение)

Отсюда найдем угловую скорость

$$\omega = \frac{2v \cdot tg\alpha}{D},$$

а частота вращения равна

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2v \cdot tg\alpha}{2\pi D} = \frac{0{,}1 \cdot tg(71{,}44)}{\pi \cdot 0{,}2} = 0{,}474 \text{ об/с}$$

2.2) За 1с через сварку проходит участок шва длиной 0,314 м. Масса участка равна

$$m_{св} = l_1 \delta s \rho = 0{,}314 \cdot 0{,}001 \cdot 0{,}002 \cdot 7900 = 0{,}00496 \text{ кг.}$$

Затраты энергии составят:

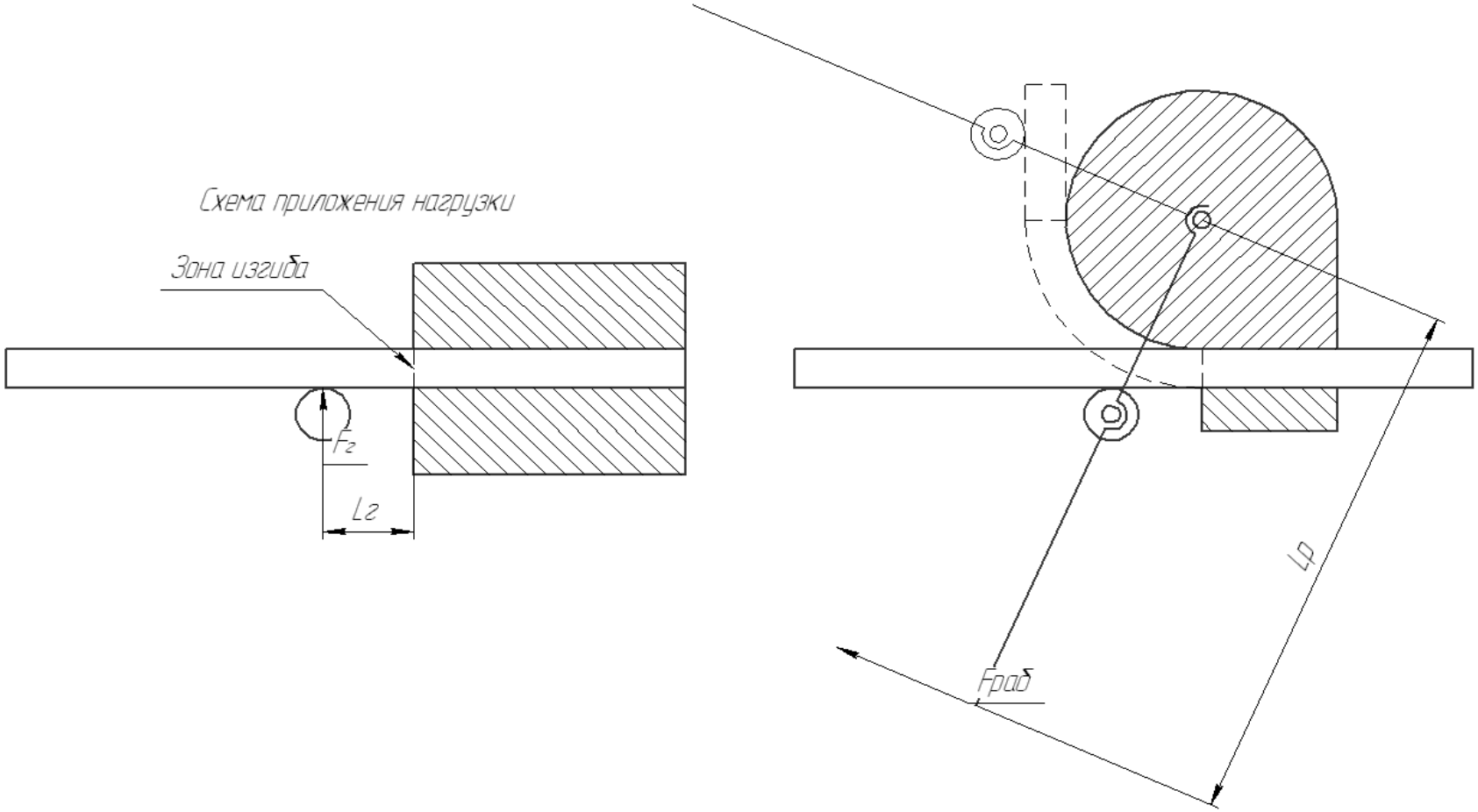
$$E = m\left(C_p\left(T_{пл} - T_0\right) + r_{пл}\right) = 0{,}00496 \cdot \left(460 \cdot \left(1200 - 300\right) + 84000\right) = 2470 \text{ Дж.}$$

Эффективная мощность сварочного процесса:

$$N = \frac{E}{t} = 2470 \text{ Вт.}$$

Задача 2. Условие

Для механизированной холодной гибки металлического проката (в основном труб) применяется ручной рычажный трубогиб, схема которого изображена на рисунке.



Задача 2. Условие (продолжение)

Для изгиба трубы необходимо приложить к ней изгибающий момент, равный произведению усилия инструмента (ролика) $F_г$ на плечо приложения силы $L_г$. Так как в качестве инструмента используется ролик, касательное усилие отсутствует. Гиб профильной трубы (20 х 20 мм) начинается по достижении момента 240 Н·м, до этого момента труба, подобно пружине, изгибается упруго (возвращается в исходное состояние после снятия нагрузки). Коэффициент изгибной упругости трубы составляет 70 Н·м/°.

1) Определить необходимое плечо рычага $L_р$, если рабочее усилие $F_{раб}$ составляет 200 Н.
2) На какой угол необходимо согнуть трубу, чтобы после распрямления упругих деформаций угол сгиба составил 90°.
3) Определите затраты энергии для изгиба трубы на угол 90°.

Задача 2. Решение

Для гиба трубы необходимо приложить к ней изгибающий момент. Согласно схеме, при повороте рычага усилие гиба $F_г$ прикладывается на плече $L_г$. Поскольку плечо это равно расстоянию от точки приложения до линии, проходящей через ось поворота рычага – именно такой момент нужно создать на рычаге. Если известен момент и усилие на конце рычага – можно найти его длину.

При приложении момента до начала пластических деформаций труба гнется упруго, но на какой бы угол её не согнули – часть трубы будет согнута упруго до тех пор, пока не снимется изгибающее усилие, после чего немного распрямится. Поскольку свойства трубы при гибе почти не меняются – угол упругих деформаций не зависит от полного угла гиба. Достаточно найти максимальный угол упругих деформаций и прибавить его к потребному углу – получим угол, до которого нужно согнуть трубу, чтобы получить искомые 90°.

Задача 2. Решение (продолжение)

Затраты энергии можно оценить как рабочее усилие, умноженное на длину описанной в ходе гиба дуги, или как момент усилия, умноженный на угол.

Необходимый момент на рычаге равен:

$$M_{изг} = L_р F_{раб}.$$

1) Определим плечо рычага:

$$L_р = \frac{M_{изг}}{F_{раб}} = \frac{240}{200} = 1{,}2 \text{ м}$$

2) Определим максимальный угол упругой деформации. Запишем по аналогии с уравнением упругой деформации пружины:

$$\alpha_{упр} = \frac{M_{изг}}{k} = \frac{240}{70} = 3{,}43^{\circ}.$$

Для получения угла рабочий угол гиба должен достигать

$$\alpha_{max} = \alpha + \alpha_{упр} = 90^{\circ} + 3{,}43^{\circ} = 93{,}43^{\circ}.$$

Задача 2. Решение (продолжение)

3) Для определения расхода энергии определим длину дуги. Только для рабочего угла 90°, так как упругий перегиб труба нам возвращает.

$$L_{дуги} = \frac{\pi}{2} L_р = 1{,}885 \text{ м.}$$

И энергия:

$$E = F_{раб} L_{дуги} = 200 \cdot 1{,}885 = 377 \text{ Дж.}$$

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

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

где S – площадь сечения отверстия, Δp – избыточное давление в ёмкости с жидкостью, ρ – плотность жидкости.

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).

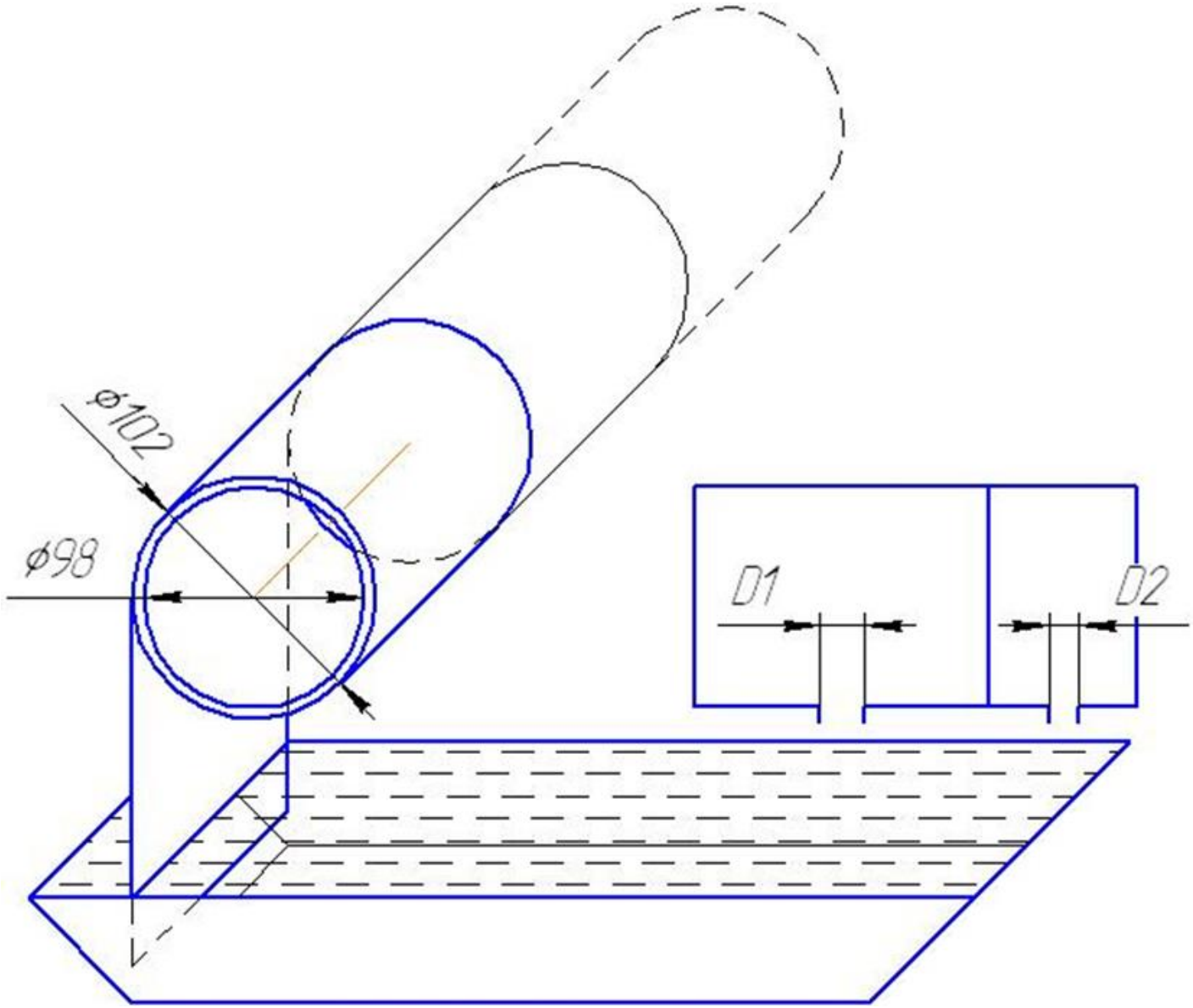
Зная производительность завода (в погонных метрах трубы за единицу времени) и площадь сечения трубы – можно определить суммарный объемный расход материала. Зная объемные доли компонентов (ткани и связующего) можно определить их объемные расходы, а зная их плотности – и массовые расходы.

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 $м^2/с$.

Задача 3. Решение (продолжение)

- 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.

Задача 3. Решение (продолжение)



Задача 3. Решение (продолжение)

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:

$$V_s = \frac{SL}{3600}, \quad \text{м}^3/\text{с}$$

Задача 3. Решение (продолжение)

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:

$$V_{ткани} = 0,2V_s,$$

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

$$V_{\text{отвердителя}} = \frac{1}{3(1-0,2)V_s}.$$

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:

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

$$M_{\text{отв}} = V_{\text{отв}}\rho_{\text{отв}}.$$

Задача 3. Решение (продолжение)

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:

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

Задача 3. Решение (продолжение)

Проведение расчетов:

1) Расход ткани

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

$$V_{ткани} = 0,2 V_s,$$

$$V_s = \frac{SL}{3600},$$

$$S = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4},$$

$$M_{\text{ткани}} = 0,2\pi \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \frac{L}{3600} \rho_{\text{стекла}} = 0,2\pi \frac{0,102^2 - 0,098^2}{4} \cdot \frac{100}{3600} \cdot 2500 = 0,00872 \text{ кг/с}$$

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

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

Задача 3. Решение (продолжение)

$$M_{\text{смолы}} = \frac{2}{3}(1-0,2)\pi\frac{D^2-d^2}{4}\cdot\frac{L}{3600}\rho_{\text{смолы}}$$

$$M_{\text{смолы}} = \frac{2}{3}(1-0,2)\pi\frac{0,102^2-0,098^2}{4}\cdot\frac{100}{3600}\cdot 1200 = 0,0167 \text{ кг/с}$$

Аналогично

$$M_{отв} = 0,00837$$

Количество слоев в ткани

$$n = \frac{D-d}{2h} = (0,102-0,098)/(2\cdot 0,0002) = 10.$$

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

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

Задача 3. Решение (продолжение)

Диаметр отверстия для подачи отвердителя, соответственно:

$$D_2 = 0{,}00069 \text{ м.}$$

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

Масса ткани для 1 п.м. трубы составляет

$$M_{\text{ткани}} = 0,2S \cdot 1\text{м} \cdot \rho_{\text{стекла}} = 0,2\pi \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot 1\text{м} \cdot \rho_{\text{стекла}}.$$

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

Масса связующего (так как плотность компонентов одинакова – рассматриваем его как один материал с плотностью 1200 кг/м^3)

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

Задача 3. Решение (продолжение)

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.

Задача 3. Решение (продолжение)

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!