

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***  
по выполнению практических работ  
по дисциплине «Методы оптимизации проектирования технологического  
оборудования»  
Направление подготовки – 15.04.02 Технологические машины и оборудование  
Профиль подготовки: Проектирование технологического оборудования \

Ставрополь, 2022

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Методы оптимизации проектирования технологического оборудования» разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 15.04.02 – Технологические машины и оборудование

Методические указания имеют целью закрепить у студентов теоретически полученные знания по дисциплине, выработать практические навыки конструирования и материального оформления оборудования химических производств и проведения его расчетов на прочность.

Приведены исходные данные и методические указания по выполнению практических заданий, список рекомендуемой литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ОБЕЧАЙКИ И ДНИЩА, НАГРУЖЕННЫХ<br>ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ.....   | 4  |
| РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ АППАРАТА, НАГРУЖЕННОГО НАРУЖНЫМ<br>ДАВЛЕНИЕМ, ОСЕВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛОЙ И ИЗГИБАЮЩИМ<br>МОМЕНТОМ..... | 8  |
| РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ОБЕЧАЙКА - ДНИЩЕ .....  | 11 |
| РАСЧЕТ НА УКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ. ВЫБОР ТИПА УКРЕПЛЕНИЯ.....   | 14 |

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

### РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ОБЕЧАЙКИ И ДНИЩА, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

По данной теме необходимо рассчитать толщину стенки обечайки и днища тонкостенных сосудов в соответствии с вариантами, приведенными в таблицах 1 и 2.

Нормативные допускаемые напряжения, пределы текучести материалов при заданных температурах, модули упругости, коэффициенты прочности сварных швов указаны в таблицах [1].

При расчете обечаек, которые представляют собой оболочки вращения, находящихся под воздействием равномерно распределенного давления, изгибающие моменты и поперечную силу не учитывают.

Теорию расчета оболочек (рисунок 1), учитывающую только  $\sigma_m$  и  $\sigma_k$ , называют безмоментной теорией оболочек, основным уравнением которой является уравнение Лапласа

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{p}{S},$$

где  $\sigma_m$  – меридиональное напряжение;

$\sigma_k$  – кольцевое напряжение;

$\rho_m, \rho_k$  – радиусы кривизны срединной поверхности оболочки.

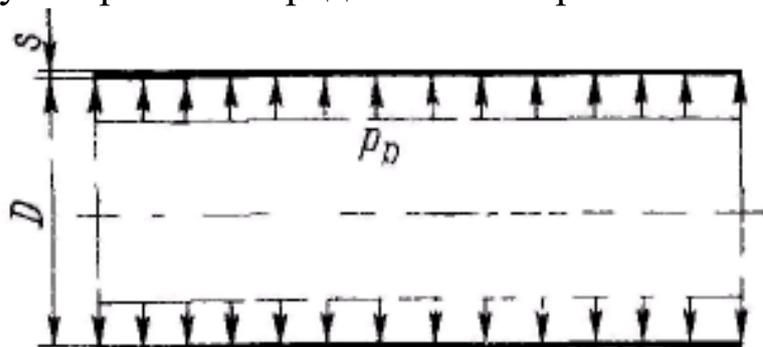


Рисунок 1 – Расчетная схема цилиндрической обечайки

На основе данного уравнения получают основные расчетные зависимости для цилиндрических, конических, сферических и эллиптических оболочек.

Исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки  $s$  определяют по формулам:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma] - p_p) \\ p_u \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma]_u - p_u) \end{array} \right\};$$

$$S = S_p + c + c_0,$$

где  $p_p$  – расчетное давление;

$p_u$  – пробное давление;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварных швов;

$D$  – диаметр аппарата;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение для рабочего состояния;

$[\sigma]_u$  – допускаемое напряжение при испытаниях;

$c$  – прибавка к расчетной толщине обечайки;

$c_0$  – прибавка на округление размера до стандартного значения.

Расчетную и исполнительную толщину стенки конической обечайки (рисунок 2) определяют по формулам:

$$S_{к.р} = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / [(2 \cdot \varphi[\sigma] - p_p) \cdot \cos \alpha] \\ p_u \cdot D / [(2 \cdot \varphi[\sigma]_u - p_u) \cdot \cos \alpha] \end{array} \right\};$$

$$S_k = S_{к.р} + c + c_0,$$

где  $S_{к.р}$  – расчетная толщина стенки конической оболочки;

$\alpha$  – угол при вершине конуса, градусы.

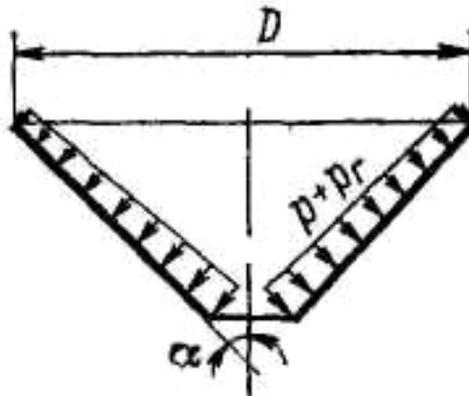


Рисунок 2 – Расчетная схема конического днища

Толщина стенки эллиптической крышки (днища) (рисунок 3):

$$S_{э.р} = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma] - 0,5 \cdot p_p) \\ p_u \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma]_u - 0,5 \cdot p_u) \end{array} \right\};$$

$$S = S_{э.р} + c + c_0,$$

где  $S_{э.р}$  – расчетная толщина стенки эллиптического днища.

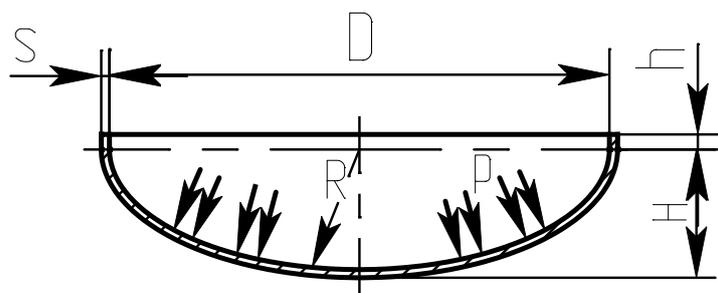


Рисунок 3 – Расчетная схема эллиптического днища

Затем для днищ проводится проверка допускаемого давления как в рабочем состоянии, так и при испытаниях:

$$p_p < [p];$$

$$p_{и} < [p],$$

Вышеуказанные формулы применимы при условии  $\frac{S - c}{D} \leq 0,1$ .

Варианты задания представлены в таблицах 1 и 2. Необходимо рассчитать толщину стенки обечайки и днища.

Таблица 1 – Параметры вулканизационного котла

| № | Размеры котла               |  | Рабочее давление в котле $p$ , МПа | Температура в котле $t_c$ , °С | Объем котла $V$ , м <sup>3</sup> | Марка стали | Скорость коррозии $P$ , мм/год | Срок эксплуатации $\tau_b$ , лет |
|---|-----------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
|   | Внутренний диаметр $D$ , мм | Длина цилиндрической части $l_{ц}$ , м |                                    |                                |                                  |             |                                |                                  |
| 1 | 800                         | 0,9                                    | 0,90                               | 180                            | 0,68                             | 10          | 0,05                           | 15                               |
| 2 | 1100                        | 1,5                                    | 0,60                               | 160                            | 1,85                             | 20          | 0,09                           | 12                               |
| 3 | 1500                        | 3,0                                    | 0,60                               | 160                            | 6,30                             | ВСт3пс      | 0,10                           | 10                               |
| 4 | 2000                        | 4,0                                    | 0,60                               | 160                            | 16,00                            | ВСт3пс      | 0,08                           | 12                               |
| 5 | 2200                        | 6,0                                    | 0,60                               | 160                            | 26,00                            | ВСт3Гпс     | 0,06                           | 15                               |
| 6 | 2800                        | 6,0                                    | 0,40                               | 150                            | 43,20                            | 10          | 0,05                           | 10                               |
| 7 | 2800                        | 8,0                                    | 1,25                               | 190                            | 57,00                            | 20          | 0,07                           | 12                               |
| 8 | 2800                        | 16,0                                   | 0,60                               | 150                            | 91,00                            | ВСт3пс      | 0,09                           | 10                               |
| 9 | 3600                        | 8,0                                    | 1,00                               | 180                            | 98,00                            | 20          | 0,04                           | 15                               |

Таблица 2 – Параметры вертикального кожухотрубчатого теплообменника

| №  | Размеры корпуса             |   | Рабочее давление $p$ , МПа | Температура в межтрубном пространстве $t_c$ , °С | Плотность среды, $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup> | Марка стали                | Скорость коррозии $P$ , мм/год | Срок эксплуатации $\tau_B$ , лет |
|----|-----------------------------|---|----------------------------|--|---|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
|    | Внутренний диаметр $D$ , мм | Высота цилиндрической части $H_{ц}$ , м |                            |  |   |                            |                                |                                  |
| 1  | 500                         | 3                                       | 6,4                        | 5  | 1000  | ВСт3сп                     | 0,05                           | 10                               |
| 2  | 500                         | 6                                       | 4,0                        | 30   | 900   | ВСт3сп                     | 0,04                           | 15                               |
| 3  | 600                         | 6                                       | 2,5                        | 200  | 1200  | 16ГС                       | 0,03                           | 10                               |
| 4  | 600                         | 9                                       | 1,6                        | 320  | 1160  | 16ГС                       | 0,06                           | 12                               |
| 5  | 800                         | 6                                       | 2,0                        | -5   | 1300  | Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т | 0,02                           | 15                               |
| 6  | 800                         | 9                                       | 3,0                        | 120  | 1400  | Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т | 0,03                           | 10                               |
| 7  | 1000                        | 6                                       | 4,2                        | 20   | 800   | ВСт3сп5                    | 0,07                           | 15                               |
| 8  | 1000                        | 9                                       | 1,6                        | -10  | 1270  | 16ГС                       | 0,04                           | 12                               |
| 9  | 1200                        | 6                                       | 2,5                        | 10   | 1000  | 16ГС                       | 0,01                           | 18                               |
| 10 | 1200                        | 9                                       | 6,4                        | 60   | 1250  | Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т | 0,02                           | 10                               |
| 11 | 1400                        | 6                                       | 3,0                        | 100  | 1100  | ВСт3сп5                    | 0,07                           | 12                               |
| 12 | 1400                        | 9                                       | 2,0                        | 80   | 950   | ВСт3сп5                    | 0,08                           | 15                               |

Примечание: при расчете теплообменника необходимо учесть, что рабочая среда жидкая.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

### РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ АППАРАТА, НАГРУЖЕННОГО НАРУЖНЫМ ДАВЛЕНИЕМ, ОСЕВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛОЙ И ИЗГИБАЮЩИМ МОМЕНТОМ

При расчете толщины стенки необходимо учесть, что тонкостенный цилиндр под внешним давлением находится по сравнению с таким же цилиндром, нагруженным внутренним давлением в худших условиях, это объясняется тем, что нагружается цилиндрическая форма аппарата и появляются дополнительные напряжения.

Внешнее давление, под действием которого первоначальная форма цилиндрической оболочки начинает искажаться, называется критическим (рисунок 4).

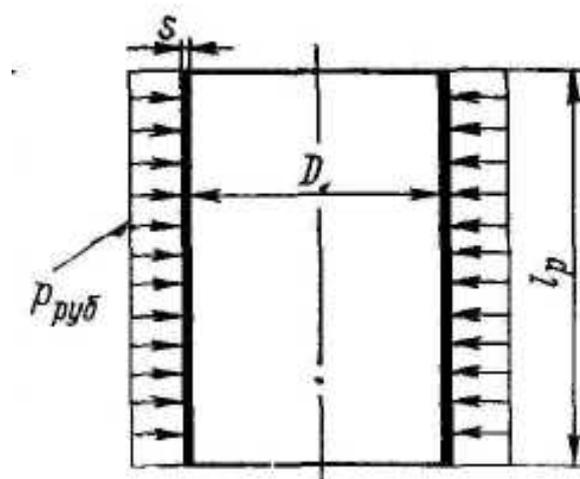


Рисунок 4 – Расчетная схема цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением

Расчетная и исполнительная толщина стенки определяется по формулам:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} K_2 \cdot D \cdot 10^{-2} \\ 1,1 \cdot p_n \cdot D / 2 \cdot [\sigma] \end{array} \right\},$$

$$S = S_p + c + c_0,$$

где  $K_2$  – коэффициент, определяемый по номограммам [1];

$p_{н.р}$  – рабочее давление;

$c$  – прибавка к расчетной толщине обечайки;

$c_0$  – прибавка на округление размера до стандартного значения.

Пробное давление при гидравлических испытаниях

$$p_{и} = 1,25 \cdot p_{н.р} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]$$

где  $[\sigma]_{20}$  – допускаемое напряжение для заданной марки стали при  $t=20^{\circ}\text{C}$ ;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение для рабочего состояния.

Условие устойчивости цилиндрической обечайки должно выполняться для рабочего состояния аппарата:

$$p_{н.р} < [p_{н}]$$

при испытании

$$p_{и} < [p_{н}]_{и},$$

где  $[p_{н}]$  и  $[p_{н}]_{и}$  – допускаемое наружное давление соответственно в рабочем состоянии и при испытании с учетом условия прочности в рабочем состоянии и условия устойчивости в пределах упругости, в зависимости от рабочей длины обечайки  $l_p$  [1].

Варианты задания представлены в таблицах 3 и 4. Необходимо рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки.

Таблица 3 – Параметры вертикального цельносварного аппарата

| № | Внутренний диаметр D, мм | Диаметр нижнего штуцера внутренний D <sub>0</sub> , мм | Высота цилиндрической части H <sub>ц</sub> , м | Остаточное давление в аппарате p <sub>ост</sub> , МПа | Температура t <sub>с</sub> , °C | Марка стали                  | Прибавка к расчетной толщине с, мм |
|---|--------------------------|--|--|---|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 1000                     | 50   | 2130   | 0,010   | 30                              | 09Г2С                        | 1,0                                |
| 2 | 1400                     | 80   | 2220   | 0,020   | 40                              | 10Х17Н13М2Т                  | 0,9                                |
| 3 | 1400                     | 120  | 3070   | 0,015   | 60                              | 12Х18Н10Т                    | 1,3                                |
| 4 | 1800                     | 100  | 3385   | 0,010   | 80                              | Двухслойная 20К+ 10Х17Н13М2Т | 0,6                                |
| 5 | 1800                     | 150  | 3785   | 0,020   | 180                             | ВСт3пс                       | 1,2                                |
| 6 | 2200                     | 200  | 4020   | 0,015   | 120                             | Двухслойная 20К+ 12Х18Н10Т   | 0,8                                |

Таблица 4 – Параметры вертикального аппарата с перемешивающим устройством

| № | Внутренний диаметр D, мм | Высота цилиндрической части H <sub>ц</sub> , м | Остаточное давление в аппарате p <sub>ост</sub> , МПа | Температура t <sub>с</sub> , °С | Марка стали | Прибавка к расчетной толщине с, мм | Масса крышки с приводом m, кг |
|---|--------------------------|--|---|---------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1000                     | 1100   | 0,010   | 25                              | ВСт3сп      | 1,0                                | 730                           |
| 2 | 1400                     | 1100   | 0,009   | 60                              | 12Х18Н10Т   | 0,7                                | 1000                          |
| 3 | 1600                     | 1200   | 0,011   | 80                              | 16ГС        | 0,9                                | 1270                          |
| 4 | 1600                     | 1700   | 0,018   | 40                              | 09Г2С       | 1,1                                | 1770                          |
| 5 | 1800                     | 1300   | 0,021   | 120                             | 10Х17Н13М2Т | 0,6                                | 2150                          |
| 6 | 1800                     | 1800   | 0,012   | 130                             | 20К         | 0,8                                | 2300                          |

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

#### РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ОБЕЧАЙКА - ДНИЩЕ

Расчетные формулы, использованные в предыдущих занятиях, выведены для случая нагружения оболочек равномерно распределенными по поверхности статическими нагрузками и справедливы для оболочек, у которых не закреплены края, а также для участков, удаленных от закрепленных краев оболочки.

В реальных конструкциях машин и аппаратов края оболочек прикрепляются к другим оболочкам и к соответствующим деталям (фланцы, трубные решетки и т.п.). В таких узлах сопряжения возникают дополнительно, так называемые, краевые нагрузки, вызывающие местные напряжения изгиба в материалах сопрягаемых элементов [2].

Краевая сила  $Q_0$  и краевой момент  $M_0$  являются реакциями заделки края оболочки (рисунок 5).

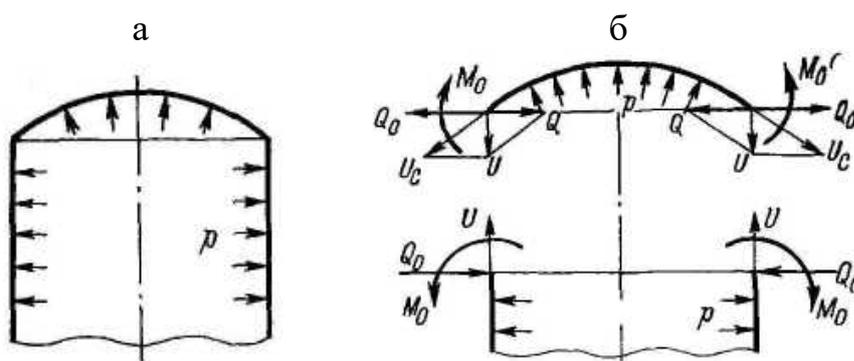


Рисунок 5 – Схема к определению краевых сил и моментов:  
 а – соединение сферической и цилиндрической оболочек; б – расчетная схема;  $U$  и  $U_c$  – меридиональные усилия соответственно цилиндрической и сферической оболочек.

Основными уравнениями для определения напряжений являются уравнения совместности деформаций:

$$\begin{cases} \Delta_p^C - \Delta_{Q_0}^C + \Delta_{M_0}^C = \Delta_p^C + \Delta_{(Q_0-Q)}^C + \Delta_{M_0}^C; \\ \Theta_p^C - \Theta_{Q_0}^C + \Theta_{M_0}^C = -\Theta_p^C - \Theta_{(Q_0-Q)}^C - \Theta_{M_0}^C, \end{cases}$$

где  $\Delta_p^C$ ,  $\Delta_{Q_0}^C$ ,  $\Delta_{M_0}^C$ ,  $\Theta_p^C$ ,  $\Theta_{Q_0}^C$ ,  $\Theta_{M_0}^C$  – радиальные, угловые деформации края цилиндрической оболочки под действием нагрузок  $p$ ,  $Q_0$ ,  $M_0$ ;

$\Delta_p^C, \Delta_{(Q_0-Q)}^C, \Delta_{M_0}^C, \Theta_p^C, \Theta_{(Q_0-Q)}^C, \Theta_{M_0}^C$  – то же для сферической оболочки.

Подставляя соответствующие значения деформаций из таблицы [1] в данное уравнение, с учетом известных геометрических размеров аппарата, получим значения  $Q_0, M_0$ .

Суммарные значения напряжений также определяются по таблицам [1].

Максимальные напряжения по краю оболочек должны быть проверены по условию прочности [1].

По данной теме необходимо: рассчитать на прочность соединение цилиндрической и конической обечаек с 1,2 мм по исходным данным таблицы 5.

Таблица 5 – Параметры вертикального колонного аппарата

| №  | Внутренний диаметр низа аппарата $D_0$ , мм | Внутренний диаметр верха аппарата $D$ , мм | Угол конуса $\alpha$ °С | Толщина стенки $s=s_k$ , мм | Внутреннее давление $p_p$ , МПа | Температура стенки $t$ , °С | Марка стали (меди, латуни, титана) |
|----|---|--|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1  | 1000  | 1200                                       | 30                      | 8                           | 0,25                            | 100                         | МЗр (медь)                         |
| 2  | 1400  | 1800                                       | 45                      | 12                          | 0,30                            | 50                          | ЛЖМц (латунь)                      |
| 3  | 1200  | 1200                                       | 70                      | 10                          | 0,45                            | 200                         | 08Х22Н6Т                           |
| 4  | 2200  | 2400                                       | 45                      | 8                           | 0,20                            | 150                         | 09Г2С                              |
| 5  | 1000  | 2200                                       | 30                      | 14                          | 0,80                            | 100                         | 10Х17Н13М2Т                        |
| 6  | 1800  | 2400                                       | 30                      | 12                          | 0,75                            | 300                         | ОТ4 (титан)                        |
| 7  | 1600  | 1800                                       | 70                      | 16                          | 1,00                            | 250                         | 08Х18Г8М2Т                         |
| 8  | 1200  | 2400                                       | 45                      | 10                          | 1,20                            | 200                         | ВТ1-0 (титан)                      |
| 9  | 2000  | 2200                                       | 70                      | 8                           | 0,60                            | 150                         | 10Х17Н13М3Т                        |
| 10 | 1400  | 2400                                       | 30                      | 14                          | 0,90                            | 50                          | М2 (медь)                          |
| 11 | 2200  | 2400                                       | 45                      | 12                          | 1,00                            | 300                         | 08Х22Н6Т                           |
| 12 | 1800  | 2200                                       | 45                      | 16                          | 1,40                            | 100                         | ЛС59-1 (латунь)                    |
| 13 | 1600  | 2000                                       | 30                      | 10                          | 1,20                            | 150                         | 08Х21Н6М2Т                         |

Рассчитать на прочность соединение двух цилиндрических обечаек, имеющих разную толщину стенки  $s=1$  мм, по данным таблицы 6.

Таблица 6 – Параметры вертикального колонного аппарата постоянно-го сечения

| №  | Внутренний диаметр аппарата D, мм | Внутреннее давление p <sub>p</sub> , МПа | Температура стенки t, °С | Марка стали (медь, латуни, титана) | Толщина стенки, мм |                |
|----|-----------------------------------|--|--------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------|
|    |                                   |  |                          |                                    | S <sub>1</sub>     | S <sub>2</sub> |
| 1  | 1600                              | 0,90                                     | 200                      | 08X18H10T                          | 8                  | 16             |
| 2  | 200                               | 0,65                                     | 250                      | BT1-1 (титан)                      | 10                 | 18             |
| 3  | 2000                              | 0,85                                     | 150                      | M2 (медь)                          | 12                 | 24             |
| 4  | 2400                              | 1,00                                     | 100                      | 16ГС                               | 8                  | 14             |
| 5  | 2000                              | 1,60                                     | 100                      | ЛС59-1 (латунь)                    | 10                 | 20             |
| 6  | 1200                              | 1,00                                     | 300                      | ВСтЗсп                             | 14                 | 24             |
| 7  | 1000                              | 0,80                                     | 300                      | 20К                                | 12                 | 18             |
| 8  | 2400                              | 1,20                                     | 250                      | MЗp (медь)                         | 12                 | 20             |
| 9  | 1000                              | 1,50                                     | 150                      | 08X18H12T                          | 10                 | 18             |
| 10 | 1200                              | 0,75                                     | 200                      | OT4 (титан)                        | 8                  | 18             |
| 11 | 1600                              | 0,50                                     | 150                      | ЛЖМц (латунь)                      | 14                 | 24             |
| 12 | 1000                              | 0,60                                     | 100                      | ВСтЗсп5                            | 16                 | 24             |
| 13 | 1200                              | 0,35                                     | 200                      | 12X18H10T                          | 10                 | 18             |
| 14 | 2000                              | 0,25                                     | 300                      | BT1-0 (титан)                      | 12                 | 24             |
| 15 | 2400                              | 0,50                                     | 100                      | 08X18H10T                          | 12                 | 18             |
| 16 | 2200                              | 0,40                                     | 250                      | 10X17H13M3T                        | 8                  | 14             |

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

### РАСЧЕТ НА УКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ. ВЫБОР ТИПА УКРЕПЛЕНИЯ

В корпусе и днище цилиндрических аппаратов для установки люков и штуцеров вырезают отверстия. Вырезанное отверстие возможно укрепить: за счет увеличения толщины стенки штуцера, торообразной вставкой, накладным кольцом. В расчетной практике наибольшее распространение получил способ укрепления отверстия накладным кольцом (рисунок 6).

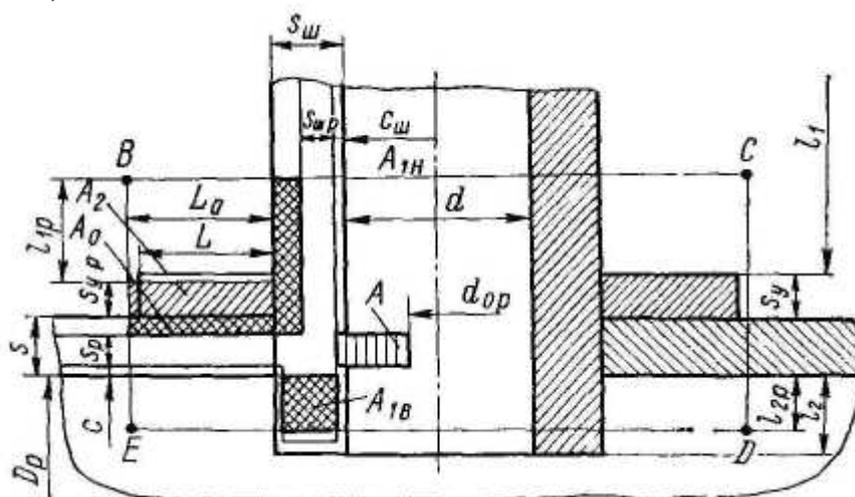


Рисунок 6 – Схема к расчету укрепления отверстия

Расчетный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки укрепленного элемента

$$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)}.$$

Условие укрепления отверстия утолщением стенки аппарата, штуцером, накладным кольцом или комбинированным укреплением.

$$\begin{aligned} & [(l_{1p} + s_{yp} + s - s_p - c) \cdot (s_{ш} - s_{шp} - c_{ш}) + l_{2p} \cdot (s_{ш} - 2c_{ш})] \cdot \chi_1 + \sqrt{D_p \cdot (s_{yp} + s - c)} \\ & \times (\chi_2 \cdot s_{yp} + s - s_p - c) \geq 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p, \end{aligned}$$

где  $l_{1p}$  – расчетная длина внешней части штуцера;

$l_{2p}$  – расчетная длина внутренней части штуцера;

$s_{yp}$  – расчетная толщина накладного кольца;

$l_1$  – общая длина штуцера,  $l_1 = 200$  мм;

$s$  – исполнительная толщина стенки аппарата;

$s_p$  – расчетная толщина стенки аппарата;

$c$  – прибавка к расчетной толщине стенки аппарата;

$s_{ш}$  – исполнительная толщина стенки штуцера;

$s_{шp}$  – расчетная толщина стенки штуцера;

$c_{ш}$  – прибавка к расчетной толщине стенки штуцера;

$$\chi_1 = [\sigma]_{ш} / [\sigma];$$

$[\sigma]_{ш}$  – допускаемое напряжение материала корпуса;

$$\chi_2 = [\sigma]_y / [\sigma];$$

$[\sigma]_y$  – допускаемое напряжение усиливающего элемента;

$d_p$  – расчетный диаметр отверстия;

$d_{op}$  – расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления.

Расчетная толщина накладного кольца  $S_{ур}$  определяется методом последовательных приближений из условия укрепления отверстия.

Исполнительная толщина накладного кольца принимается по конструктивным соображениям [1].

По теме данного занятия необходимо рассчитать укрепление отверстия, предварительно выбрав тип укрепления.

Исходные данные представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры укрепляемых цилиндрических оболочек

| № | Внутренний диаметр оболочки (максимальный) $D$ , мм | Марка стали | Расчетное давление, МПа | Расчетная температура $t$ , °С | Длина неукрепленной части оболочки $l$ , мм | Исполнительная толщина стенки оболочки $s$ , мм | Диаметр отверстия $d$ , мм | Длина внешней части штуцера $l_1$ , мм | Длина внутренней части штуцера $l_2$ , мм | Прибавка к расчетной толщине стенки $c$ , мм |
|---|---|-------------|-------------------------|--------------------------------|---|---|----------------------------|--|---|--|
| 1 | 2   | 3           | 4                       | 5                              | 6   | 7   | 8                          | 9                                      | 10  | 11   |
| 1 | 2400  | ВСтЗсп      | 0,6                     | 100                            | 2500  | 7   | 500                        | 300                                    | 15  | 0,8  |
| 2 | 2400  | 12X18H10T   | 1,0                     | 100                            | 2500  | 10  | 150                        | 250                                    | 5   | 1,0  |
| 3 | 2400  | 08X18H10T   | 1,6                     | 100                            | 2500  | 18  | 200                        | 250                                    | 5   | 1,2  |
| 4 | 2800  | 09Г2С       | 0,3                     | 200                            | 7200  | 5   | 200                        | 150                                    | -   | 1,0  |
| 5 | 2800  | 20К         | 0,8                     | 200                            | 9000  | 12  | 300                        | 150                                    | 5   | 0,8  |
| 6 | 2800  | 10X17H13M2T | 1,2                     | 200                            | 1200  | 16  | 300                        | 250                                    | 5   | 1,0  |
| 7 | 3000  | ВСтЗсп      | 1,0                     | 300                            | 1300  | 18  | 500                        | 250                                    | -   | 1,2  |

Продолжение таблицы 7

| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i>    | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> | <i>11</i> |
|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 8        | 2000     | ВСтЗсп      | 0,6      | 100      | 2500     | 8        | 150      | 150      | -         | 1,0       |
| 9        | 2800     | 09Г2С       | 0,5      | 150      | 7200     | 8        | 200      | 150      | -         | 0,8       |
| 10       | 2400     | 20К         | 0,5      | 200      | 4500     | 8        | 250      | 200      | 5         | 1,0       |
| 11       | 2800     | 10X17H13M2T | 0,4      | 250      | 9000     | 8        | 300      | 200      | -         | 1,2       |
| 12       | 2800     | 08X18H10T   | 0,5      | 300      | 7200     | 10       | 400      | 300      | 10        | 1,0       |
| 13       | 2000     | 08X18H10T   | 1,6      | 20       | 2500     | 16       | 200      | 200      | 5         | 1,2       |
| 14       | 1800     | 20К         | 0,6      | 20       | 2800     | 6        | 180      | 200      | -         | 1,0       |
| 15       | 1000     | 12X18H10T   | 1,2      | 20       | 1800     | 8        | 120      | 150      | 10        | 1,0       |
| 16       | 1000     | ВСтЗсп      | 1,0      | 20       | 2000     | 8        | 150      | 250      | -         | 1,2       |
| 17       | 1200     | 12X18H10T   | 0,6      | 20       | 1500     | 5        | 200      | 250      | -         | 1,0       |
| 18       | 1800     | 12X18H10T   | 0,8      | 20       | 2800     | 7        | 100      | 120      | -         | 1,0       |
| 19       | 1800     | 12X18H10T   | 0,8      | 20       | 2500     | 7        | 200      | 200      | 10        | 1,0       |
| 20       | 1200     | 09Г2С       | 0,8      | 100      | 2500     | 6        | 150      | 200      | -         | 1,2       |

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования**  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**  
Невинномысский технологический институт (филиал)

**МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

методические указания к курсовому проектированию  
для студентов направления 15.04.02 Технологические машины и обо-  
рудование

Невинномысск 2022

Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Методы оптимизации проектирования технологического оборудования» разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 15.04.02 Технологические машины и оборудование.

Методические указания предназначены для студентов очно-заочной формы обучения, выполняющих курсовые проекты по ПТМО. Указания включают требования к содержанию и оформлению курсового проекта, методические рекомендации по расчету оборудования, список рекомендуемой литературы.

Рекомендации по проектированию технологических машин и оборудования могут быть использованы и при выполнении соответствующих разделов ВКР.

Составитель:

Рецензент:

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| СОДЕРЖАНИЕ .....   | 3  |
| 1 ЦЕЛЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....                                   | 4  |
| 2 СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТА .....   | 4  |
| 2.1 Тематика курсового проектирования.....                             | 5  |
| 2.2 Пояснительная записка .....  | 5  |
| <b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b> .....                                       | 5  |
| <i>Описание технологической схемы узла</i> .....                       | 5  |
| <i>Обзор и анализ существующих конструкций</i> .....                   | 5  |
| <i>Обоснование оптимизации оборудования для проектирования</i> .....   | 5  |
| <b>АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b> .....                                       | 6  |
| <i>Технологический расчет</i> .....                                    | 6  |
| <i>Конструирование и расчет на прочность корпусных элементов</i> ..... | 6  |
| <i>Список использованных источников</i> .....                          | 6  |
| <b>ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b> .....   | 6  |
| 3 ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА.....  | 6  |
| 4 ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....                                       | 6  |
| РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....  | 7  |
| Учебники, учебные пособия и монографии .....                           | 7  |
| Пособия по проектированию и примеры расчетов .....                     | 8  |
| Справочная литература.....   | 10 |

## 1 ЦЕЛЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Целью курсового проектирования является закрепление и углубление теоретических знаний путем применения их к решению конкретных расчетно-конструкторских задач при проектировании технологического оборудования, используемого в различных отраслях химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из пояснительной записки объемом до 30 страниц формата А4 и графической части объемом 3 листа формата А1.

Пояснительная записка включает:

титульный лист на курсовой проект;

задание на проектирование;

ведомость технического проекта;

титульный лист на пояснительную записку;

содержание;

введение;

*теоретическую часть:*

описание схемы технологического узла;

краткий обзор и анализ существующих конструкций оборудования, аналогичных проектируемому;

обоснование прототипа оборудования для проектирования;

*аналитическую часть:*

технологический расчет проектируемого оборудования;

конструирование и расчет на прочность корпусных элементов;

заключение;

список использованных источников;

приложение.

Графическая часть включает: чертеж схемы технологического узла - 1 лист формата А2, чертеж общего вида проектируемого аппарата.

рата (машины) - 1 лист формата А1, 1 лист формата А2 (выноски узлов); чертежи 2-3 сборочных единиц оборудования на 1 лист формата А1.

## **2.1 Тематика курсового проектирования**

В состав проекта входит технологический расчет проектируемого аппарата (машины) технологического узла, конструирование и расчет на прочность корпусных элементов. В качестве оборудования для проектирования назначаются:

1. Оптимизация оборудования для реакционного процесса.
2. Оптимизация оборудования для массообменного процесса.
3. Оптимизация оборудования для теплового процесса.
4. Оптимизация оборудования для гидродинамического процесса.
5. Оптимизация оборудования для механического процесса.

## **2.2 Пояснительная записка**

*Во введении* обосновывают необходимость и актуальность выполнения проекта по данной теме, исходя из перспектив развития химической технологии, нефтехимии, биотехнологии и химического машиностроения. Указывают также роль и место в народном хозяйстве отраслей - производителя и потребителя продукта, получение которого обусловлено заданием на курсовое проектирование. Кратко характеризуют технологию получения продукта и место проектируемого оборудования в технологическом узле.

### ***ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ***

*Описание технологической схемы узла.*

*Обзор и анализ существующих конструкций оборудования, аналогичных проектируемому.*

*Обоснование оптимизации оборудования для проектирования.*

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Технологический расчет**

#### **Конструирование и расчет на прочность корпусных элементов**

**В заключении** подводят итоги проделанной работы: констатируют, какое оборудование спроектировано, какие его технико-экономические характеристики (производительность, расход теплоносителей, рабочие температуры и давление, поверхность теплообмена, число тарелок и т.п.) и дают оценку спроектированного аппарата (машины) с точки зрения его соответствия выданному заданию.

#### **Список использованных источников**

Литературные источники (включая регламенты, нормативно – технические документы) располагают в порядке упоминания в тексте пояснительной записки. Описание источников должно соответствовать требованиям ГОСТ.

**В приложения** входят спецификации к чертежам сборочных узлов оборудования, различные таблицы, графики и др.

## **ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **3 ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА**

Пояснительную записку и графическую часть курсового проекта оформляют в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и методических указаний (СКФУ, кафедры ХТМАХП НТИ).

### **4 ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Законченный проект после проверки руководителем переплетается, подписывается автором проекта, руководителем и утверждается

заведующим кафедрой.

Проект направляется на защиту на очередном заседании комиссии, создаваемой на кафедре. Студент при защите в коротком докладе (5 – 7 мин.) должен раскрыть задачи, решаемые в проекте, их актуальность, принятые решения. После доклада члены комиссии могут задавать студенту вопросы по содержанию проекта. При ответе на вопросы разрешается пользоваться пояснительной запиской.

Комиссия дает оценку качеству выполненного проекта и его защите и выставляет студенту оценку.

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

### **Учебники, учебные пособия и монографии**

1. Процессы и аппараты химической технологии в 5-ти томах. / Под ред. А.М. Кутепова – М.: Логос, 2001 - 2005г.г.

2. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии./ Скобло А.И. и др. – М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2000. 677 с.

3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973. 742 с.

4. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. - М.: Химия, 1978. 277 с.

5. Машины и аппараты химических производств. /Под ред. И.И. Чернобыльского. - М.: Машиностроение, 1974. 456 с.

6. Рамм В.М. Абсорбция газов. - М.: Химия, 1976. 656 с.

7. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1966. 848 с.

8. Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я. Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем. - М.: Химия, 1991. 344 с.

9. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. - М.: Энергия, 1977. 424 с.

10. Жужиков В.А. Фильтрация. - М.: Химия, 1980. 400 с.

11. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности.

М.: Химия, 1977. 368 с.

12. Исламов М.Н. Печи химической промышленности. - Л.: Химия, 1975. 432 с.

13. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. 429 с.

14. Рашковская Н.Б. Сушка в химической промышленности. – Л.: Химия, 1977. 77с.

15. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. - М.: Машиностроение, 1987. 432с.

16. Каталымов А.В., Любартович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. - Л.: Химия, 1990. 240 с.

17. Коузов П.А., Малыгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. - Л.: Химия, 1982. 256с.

18. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н., Вишнев Ю.Н. Арматура химических установок. - Л.: Химия, 1979. 320с.

19. Берд Р., Стьюарт В., Лайфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. 688с.

### **Пособия по проектированию и примеры расчетов**

20. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. / Под ред. Ю.И. Дытнерского - М.: Химия, 1983. 272 с.

21. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - Л.: Химия, 1981. 552 с.

22. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. - М.: Химия, 1971. 448 с.

23. Кузнецов А.А., Кагерманов С.М., Судаков Е.Н. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. - М.: Химия, 1976. 334 с.

24. Кузнецов А.А., Судаков Е.Н. Расчеты основных процессов и аппаратов переработки углеводородных газов. Справочное пособие. – М.: Химия, 1983. 224 с.
25. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Основы расчета и конструирования массообменных колонн. – Киев: Выща шк., 1989. 223 с.
26. Эмирджанов Р.Т., Лемберанский Р.А. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии. - М.: Химия, 1989. 192 с.
27. Технологические расчеты установок переработки нефти. / Танатаров М.А. и др. – М.: Химия, 1987. 352 с.
28. Сарданашвили А.Г., Львова А.И. Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа. – М.: Химия, 1973. 272 с.
29. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи. / Под ред. В.Н. Соколова. - Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.
30. Свидченко А.И., Проскурнин А.Л. Ректификация бинарных смесей. Методика расчетная. Учебное пособие. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. 85 с.
31. Свидченко А.И. Расчет пневмотранспорта зернистых материалов. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Процессы и аппараты химической технологии" для студентов специальностей 170500 – «Машины и аппараты химических производств» и 250200 – «Химическая технология неорганических веществ». - Невинномысск: НТИ СевКавГТУ, 2002. 22 с.
32. Чеботарев Е.А., Свидченко А.И. Расчет горизонтального кожухотрубного теплообменника. Методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Процессы и аппараты химической технологии», «Процессы и аппараты пищевых производств», к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 170500, 170600, 250200 и 250400. - Невинномысск: НТИ СевКавГТУ, 2002. 26 с.

33. Филиппов Л.П. Прогнозирование теплофизических свойств жидкостей и газов.– М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.

34. Свидченко А.И. Расчет свойств рабочих веществ химической технологии. Физико-химические характеристики. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Процессы и аппараты химической технологии" для студентов специальностей 170500 – «Машины и аппараты химических производств» и 250200 – «Химическая технология неорганических веществ». - Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. 29 с.

35. Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок. - М.: Высш. шк., 1989. 304 с.

36. Кувшинский М. Н., Соболева А.П. Курсовое проектирование по предмету "Процессы и аппараты химической технологии". - М.: Высшая школа, 1980. 223 с.

37. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1991. 351 с.

### **Справочная литература**

38. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. - Калуга: изд. Н. Бочкаревой, 2002. т.1, 852 с.; т.2, 1028 с.; т.3, 968 с.

39. Объемные компрессоры. Атлас конструкций. / Под ред. Г.А. Поспелова. – М.: Машиностроение, 1994. 120 с.

40. Справочник химика. М. - Л.: Химия, 1962. т. 1, 1070 с.; 1964. т. 3, 1004 с.; 1965. т. 4, 976 с.; 1966. т. 5, 974 с.; 1967. т. 6, 1012 с.

41. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник. / Под ред. Е. Н. Судакова. - М.: Химия, 1979. 568 с.

42. Справочник по пыли- и золоулавливаю. / Под ред. Л. А. Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

43. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. 720 с.

44. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (экспериментальные данные и методы расчета). Справ. изд. – СПб.: Химия, 1996. 312 с.
45. Рудин М.Г., Драбкин А.Е. Краткий справочник нефтепереработчика. – Л.: Химия, 1980. 328 с.
46. Справочник азотчика. – М.: Химия, 1986. 512 с.
47. Тепловая изоляция. Справочник строителя./ Под ред. Г.Ф. Кузнецова. - М.: Стройиздат, 1985. 421 с.

# МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

методические указания к курсовому проектированию  
для студентов направления 15.04.02 Технологические машины и обо-  
рудование

Составители: *доц. Свидченко А.И.*

Рецензент: *доц. А.М. Новоселов*

Редактор

---

Подписано в печать 20 г. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л.

Тираж 50

Невинномысский технологический институт (филиал)  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

---

Отпечатано в типографии НТИ (филиала) ФГАОУ ВО «СКФУ»  
357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1