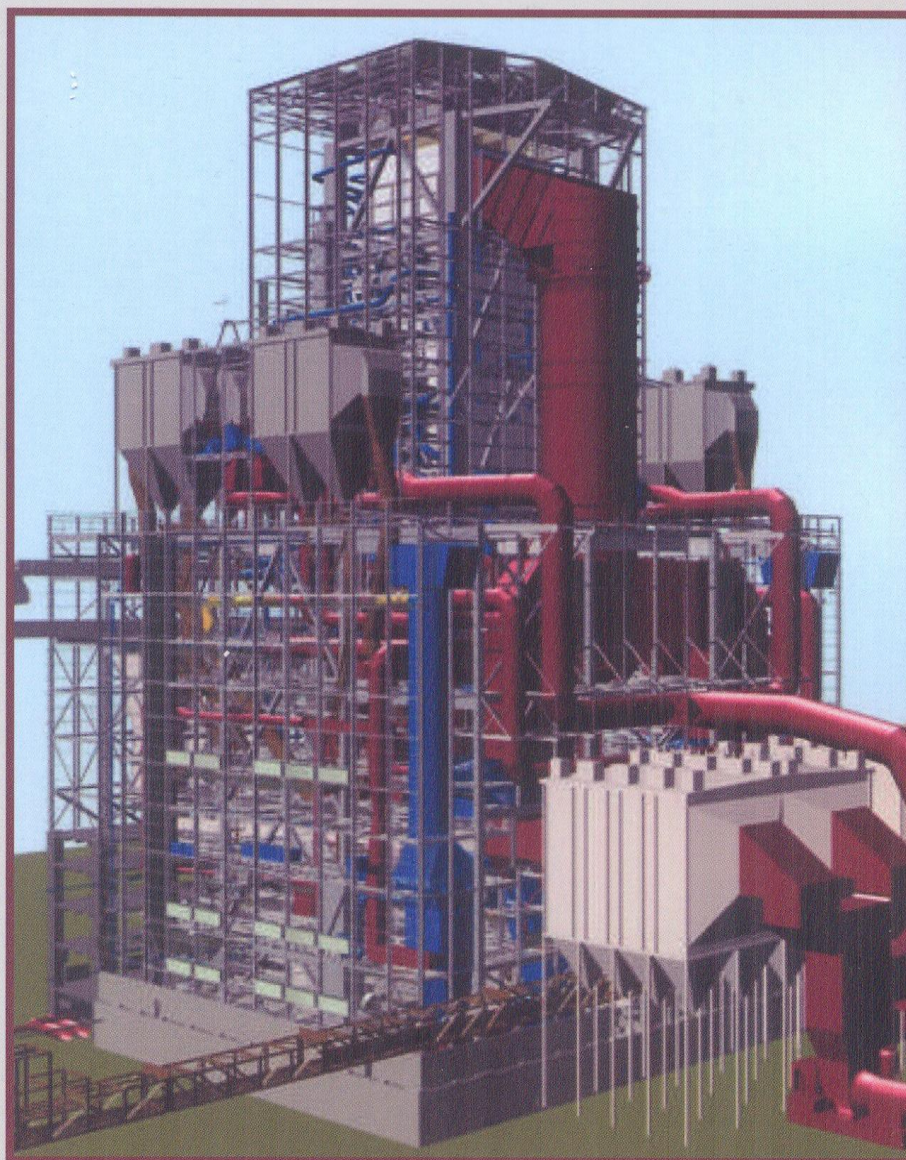


УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Љ. Бркић
Т. Живановић
Д. Туцаковић



ТЕРМИЧКИ ПРОРАЧУН ПАРНИХ КОТЛОВА

Београд,
2022.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Љ. Бркић
Т. Живановић
Д. Туцаковић

ТЕРМИЧКИ ПРОРАЧУН ПАРНИХ КОТЛОВА

ШЕСТО ИЗДАЊЕ

Београд
2022.

Универзитет у Београду
Машински факултет

Др Љубиша Бркић, редовни професор у пензији
Др Титослав Живановић, редовни професор у пензији
Др Драган Туцаковић, редовни професор

ТЕРМИЧКИ ПРОРАЧУН ПАРНИХ КОТЛОВА
- VI издање -

Рецензенти:

Др Панто Перуновић, редовни професор у пензији
Др Милован Студовић, редовни професор у пензији

Универзитет у Београду
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Ул. Краљице Марије бр. 16, Београд
тел. (011) 3370-760
факс. (011) 3370-364
www.mas.bg.ac.rs

За издавача:

Декан, др Владимир Поповић, ред. проф.

Уредник:

др Милан Лечић, ред. проф.
Председник комисије за издавачку делатност
Машинског факултета у Београду

Тираж: 100 примерака

Штампање VI издања одобрила:
Комисија за издавачку делатност
Машинског факултета у Београду

и

Декан Машинског факултета
Одлуком бр. 18/2022
од 30.08.2022. године

Штампа: "Планета-принт", 11000 Beograd
www.planeta-print.rs

Београд, 2022. године

ISBN 978-86-6060-129-4

ПРЕДГОВОР

У другом издању ове књиге су, поред приказа термичког прорачуна парних котлова заснованог на методологији научно-истраживачке организације ЦКТИ [1] који се садржи у првом издању, приказани и прорачун ложишта парних котлова према условима спречавања зашљакивања и условима догоривања угљеног праха [9], као и зонални прорачун ложишта парних котлова са модификованим системом припреме угљеног праха [10].

Имајући у виду да домаћи угљеви не захтевају примену ложишта са одвођењем шљаке у течном стању, из овог издања изостављено је поглавље о прорачуну размене топлоте у двокоморним ложиштима парних котлова, као и напомене у осталом делу текста које се односе на овај прорачун.

Графички део књиге је смањен, јер су у овом издању, имајући у виду развој рачунске технике, изостављени номограми за одређивање појединих величина израђени на основу образаца из текста.

Прилог III је проширен тако што су, осим примера термичког прорачуна енергетског парног котла датог и у првом издању, приказани и примери прорачуна тог истог прорачуна зоналном методом [10] и конструктивном методом [9], као и пример прорачуна регенеративног ротационог загрејача ваздуха.

У четвртој, допуњеној и измењеној издању промењен је изглед предње стране књиге. У књизи су учињене још и ситније исправке текста које су уследиле због промене цитираних прописа. Исто тако, исправљене су и уочене штампарске и друге грешке. Пето издање ове књиге није претрпело измене у односу на претходно, четврто издање.

Као и прво, и ово шесто издање је намењено студентима Модула за термотехнику и Модула за термоенергетику Машинског факултета Универзитета у Београду са циљем да им олакша праћење наставе и израду пројекта и рачунског дела испита из групе предмета Парни котлови, али се, исто тако, њоме могу користити и студенти других факултета чији план и програм обухвата термички прорачун парних котлова. Поред тога, предвиђени обим материје је довољан да може корисно да послужи и стручњацима који раде на пројектовању парних котлова.

Захваљујемо се и овај пут др Панту Перуновићу, професору у пензији и др Миловану Студовићу, професору у пензији на низу стручних савета и свесрдној помоћи коју су нам пружили током израде ове књиге.

Изузетан труд да књига има висок технички ниво уложила је Лепосава Радојковић, због чега јој се и овом приликом захваљујемо.

Љ. Бркић
Т. Живановић
Д. Туцаковић

САДРЖАЈ

| | | |
|--|--|----|
| 1. Увод | | 7 |
| 2. Гориво | | 9 |
| 2.1. Чврсто и течно гориво | | 9 |
| 2.1.1. Топлотна моћ | | 9 |
| 2.1.2. Разне масе горива и прерачунавање са једне масе на другу | | 9 |
| 2.1.3. Класификација угља | | 10 |
| 2.1.4. Класификација течног горива | | 11 |
| 2.2. Гасовито гориво | | 12 |
| 2.3. Мешавине горива | | 13 |
| 2.4. Карактеристике горива | | 14 |
| 3. Физичке карактеристике радних медијума парног котла | | 15 |
| 4. Запремине и енталпије ваздуха и продуката сагоревања | | 17 |
| 4.1. Израчунавање запремина и енталпија | | 17 |
| 4.2. Коефицијент вишка ваздуха и његови прираштаји у гасном тракту парног котла | | 21 |
| 5. Топлотни биланс парног котла | | 23 |
| 6. Прорачун размене топлоте у ложишту | | 27 |
| 6.1. Геометријске карактеристике ложишта | | 27 |
| 6.1.1. Запремина ложишта | | 27 |
| 6.1.2. Површина зидова ложишта | | 27 |
| 6.1.3. Озрачена грејна површина | | 30 |
| 6.1.4. Дебљина гасног слоја | | 30 |
| 6.2. Степен црноће пламена | | 30 |
| 6.2.1. Степен црноће пламена гасовитог и течног горива | | 31 |
| 6.2.2. Степен црноће пламена чврстог горива | | 32 |
| 6.2.3. Степен црноће пламена мешавине горива | | 32 |
| 6.2.4. Коефицијенти неравномерне осветљености полуозрачених прегрејача и припадајућих екрана | | 33 |
| 6.3. Прорачун размене топлоте у једнокоморним и полуотвореним ложиштима | | 34 |
| 6.3.1. Теоријска температура гасова | | 34 |
| 6.3.2. Коефицијент температурског поља у ложишту | | 35 |
| 6.3.3. Степен црноће ложишта | | 37 |
| 6.3.4. Степен топлотне ефикасности екрана | | 37 |
| 6.3.5. Термички прорачун ложишта при сагоревању мешавине горива | | 38 |
| 6.4. Зонални термички прорачун ложишта | | 38 |
| 6.5. Димензионисање ложишта према условима спречавања зашљакивања и догоравања угљеног праха | | 42 |
| 6.5.1. Висина активне зоне | | 43 |
| 6.5.2. Висина зоне догоравања | | 45 |
| 6.5.2.1. Средња брзина димних гасова у ложишту | | 45 |
| 6.5.2.2. Брзина лебдења најкрупније честице | | 46 |
| 6.5.2.3. Време сагоревања | | 47 |
| 6.5.3. Губитак услед механичке непотпуности сагоревања | | 50 |
| 6.6. Зонални термички прорачун ложишта са модификованим системом припреме угљеног праха | | 50 |
| 6.6.1. Коефицијенти вишка ваздуха | | 51 |
| 6.6.2. Биланс димних гасова у ложишту | | 52 |
| 6.6.3. Теоријска температура примарне и секундарне зоне | | 53 |
| 6.6.4. Температуре димних гасова на крају појединих зона | | 54 |
| 6.6.4.1. Температура димних гасова на крају примарне зоне | | 54 |
| 6.6.4.2. Температура димних гасова на крају секундарне зоне | | 55 |
| 6.6.4.3. Температура димних гасова на крају рецикулационе зоне | | 56 |
| 6.6.5. Начини одређивања појединих величина | | 57 |
| 7. Прорачун конвективних и полуозрачених грејних површина | | 59 |
| 7.1. Основне једначине | | 59 |
| 7.1.1. Једначина размене топлоте | | 59 |
| 7.1.2. Једначина топлотног биланса | | 59 |
| 7.1.2.1. Количина топлоте дозрачена из ложишта | | 60 |
| 7.2. Коефицијент пролаза топлоте | | 61 |
| 7.2.1. Коефицијент прелаза топлоте конвекцијом | | 63 |
| 7.2.1.1. Брзина струјања | | 63 |
| 7.2.1.2. Површина пресека | | 64 |
| 7.2.1.3. Рачунска температура гасова | | 65 |
| 7.2.1.4. Коефицијент прелаза топлоте при попречном наструјавању | | 65 |
| 7.2.1.5. Коефицијент прелаза топлоте при уздужном наструјавању | | 67 |
| 7.2.2. Коефицијент прелаза топлоте зрачењем продуката сагоревања | | 70 |
| 7.2.2.1. Коефицијент прелаза топлоте зрачењем | | 70 |
| 7.2.2.2. Температура зида цеви | | 71 |
| 7.2.2.3. Прорачун зрачења гасне запремине | | 72 |
| 7.2.3. Коефицијент пролаза топлоте грејних површина са уздужним и попречним ребрима | | 73 |
| 7.2.3.1. Оребрени загрејачи воде | | 73 |
| 7.2.3.2. Загрејачи воде са уздужним ребрима | | 73 |
| 7.2.3.3. Оребрени загрејачи ваздуха | | 73 |
| 7.2.3.4. Плочасти загрејачи ваздуха | | 74 |
| 7.2.3.5. Настандардни оребрени елементи | | 74 |
| 7.2.4. Коефицијент задрљаности, коефицијент искоришћења и степен топлотне ефикасности грејних површина | | 76 |
| 7.2.4.1. Чврсто гориво | | 76 |
| 7.2.4.2. Течно гориво | | 78 |
| 7.2.4.3. Гасовито гориво | | 79 |
| 7.2.4.4. Опште напомене | | 79 |
| 7.3. Средња температурска разлика | | 80 |
| 7.3.1. Супротносмерно и истосмерно | | |

| | | | |
|---|-----------|--|------------|
| струјање | 80 | ваздуха | 104 |
| 7.3.2. Комбиновано струјање | 81 | 9.2.1.3. Брзина гасова | 104 |
| 7.3.2.1. Наизменично комбиновано струјање | 81 | 9.2.1.4. Корак и пречник цеви | 105 |
| 7.3.2.2. Паралелно комбиновано струјање | 81 | 9.2.2. Прегрејачи паре и цевни снопови испаривача | 106 |
| 7.3.2.3. Унакрсно струјање | 83 | 9.2.3. Загрејачи воде и прелазне зоне | 107 |
| 7.3.2.4. Остали начини струјања | 84 | 9.2.4. Загрејачи ваздуха | 107 |
| 7.3.2.5. Одређивање средње температурске разлике при већим променама топлотног капацитета | 84 | | |
| 8. Препоруке за термички прорачун парног котла | 86 | 10. Упутства за пројектовање и прорачун хладњака паре и размењивача топлоте | 109 |
| 8.1. Ток и редослед прорачуна | 86 | 10.1. Хладњаци са убризгавањем | 109 |
| 8.1.1. Опште напомене | 86 | 10.2. Размењивачи топлоте пара-пара (бифлукс) | 109 |
| 8.1.2. Конвективне грејне површине | 86 | 10.3. Размењивачи топлоте димни гасови-пара-пара (трифлукс) | 110 |
| 8.1.3. Парни котлови са накнадним грејним површинама у једном ступњу | 87 | 10.4. Размењивачи топлоте за добијање "сопственог" кондензата и површински хладњаци | 111 |
| 8.1.4. Парни котлови са накнадним грејним површинама у два ступња | 88 | 11. Прорачун загрејача ваздуха са последним предајником топлоте | 114 |
| 8.1.5. Прорачун допунских грејних површина | 89 | Прилог I | |
| 8.1.6. Редослед представљања тока прорачуна | 89 | Табеле | 115 |
| 8.2. Прорачун ложишта | 90 | Садржај | 116 |
| 8.3. Прорачун прегрејача паре | 90 | Прилог II | |
| 8.4. Прорачун прелазних зона проточних котлова | 93 | Номограми | 139 |
| 8.5. Прорачун конвективних цевних снопова и цевних решетки | 93 | Списак номограма | 140 |
| 8.6. Прорачун накнадног прегрејача | 94 | Прилог III | |
| 8.7. Прорачун загрејача воде | 94 | Примери термичког прорачуна | 173 |
| 8.8. Прорачун загрејача ваздуха | 95 | Садржај | 174 |
| 9. Кратка упутства за пројектовање ложишта и грејних површина | 97 | P.1. Прорачун парног котла са прорачуном ложишта по интегралној методи | 175 |
| 9.1. Ложишта | 97 | P.2. Прорачун ложишта парног котла са модификованим системом припреме угљеног праха по зоналној методи | 222 |
| 9.1.1. Ложишта са сагоревањем у слоју | 97 | P.3. Прорачун ложишта према условима спречавања зашљакивања и догоревања угљеног праха | 227 |
| 9.1.2. Ложишта са сагоревањем у лету | 99 | P.4. Прорачун регенеративног ротационог загрејача ваздуха | 231 |
| 9.1.2.1. Чврста горива | 99 | Литература | 237 |
| 9.1.2.2. Течна и гасовита горива | 101 | | |
| 9.2. Грејне површине | 102 | | |
| 9.2.1. Опште напомене | 102 | | |
| 9.2.1.1. Температура излазних гасова | 102 | | |
| 9.2.1.2. Температура загрејаног | | | |

$$V_{grz}'' = V_g \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (238)$$

Материјални биланс гасова у ложишту парног котла са модификованим системом припреме угљеног праха приказан је на сл. 16.

6.6.3. ТЕОРИЈСКА ТЕМПЕРАТУРА ПРИМАРНЕ И СЕКУНДАРНЕ ЗОНЕ

Теоријска (адијабатска) температура примарне зоне износи

$$t_a^{pz} = \frac{Q_f^{pz}}{(Vc)_a^{pz}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (239)$$

Количина топлоте ослобођена у примарној зони (теоријска енталпија примарне зоне) је

$$Q_f^{pz} = I_a^{pz} = Q_{fpr}^r \frac{\eta_f^{pz}}{100\gamma_{pz}} + Q_v^{pz} - Q_{vv}^{pz} + Q_f^{pz} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (240)$$

Расположива количина топлоте радног горива у примарној зони износи

$$Q_{fpr}^r = H_{dsg}^{pz} - Q_{H_2O}^{pz} + Q_{vv}^{pz} + Q_G^{pz} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (241)$$

Топлотна моћ сушеног горива већа је од топлотне моћи радног горива за топлоту која би се ут-

рошила за испаравање одстрањене влаге, па се може написати да је

$$H_{dsg}^{pz} = g(H_d + 2500\Delta W) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (242)$$

Влага која је из горива испарила у млину уводи се у примарну зону са делом отпарака (l), па је њена физичка топлота у примарној зони

$$Q_{H_2O}^{pz} = 2500 l \Delta W \quad [\text{kJ/kg}] \quad (243)$$

У примарну зону се уводи део количине топлоте предгрејаног ваздуха који одговара делу горива уведеном у њу

$$Q_{vv}^{pz} = gQ_{vv} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (244)$$

а исто тако и део физичке топлоте горива

$$Q_G^{pz} = gQ_G \quad [\text{kJ/kg}] \quad (245)$$

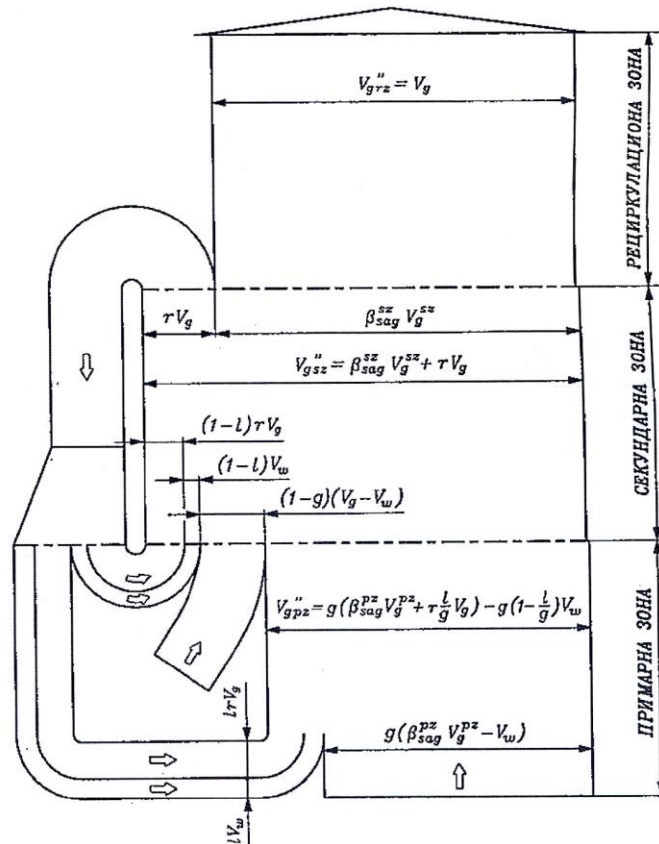
и део топлоте загрејаног ваздуха

$$Q_v^{pz} = gQ_v \quad [\text{kJ/kg}] \quad (246)$$

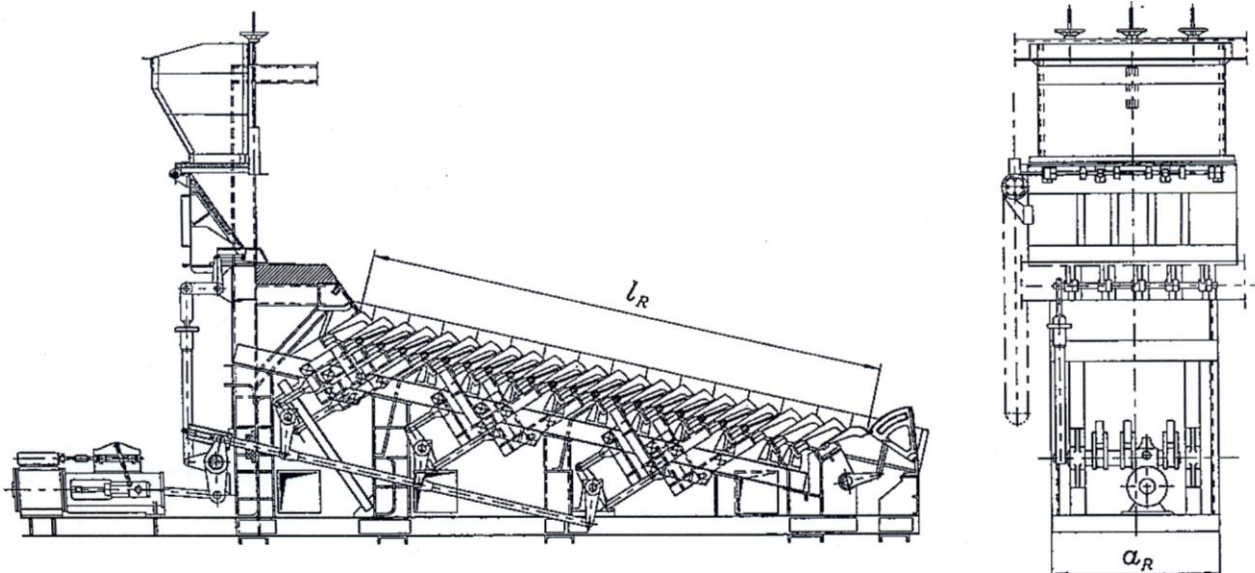
Топлота рециркулисаних гасова која се уводи у примарну зону одговара делу отпарака који одлази у њу

$$Q_r^{pz} = l r I_{gr} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (247)$$

Према томе, количина топлоте ослобођена у примарној зони (теоријска енталпија примарне зоне) износи



Слика 16. Материјални биланс гасова у ложишту котла са модификованим системом припреме угљеног праха



| Једнострука | | | |
|-------------|-------|-------|----------------|
| Тип | l_R | a_R | A_R |
| | mm | mm | m ² |
| 1A | 4570 | | 7,5405 |
| 1B | 5790 | 1650 | 9,5535 |
| 1C | 7300 | | 12,0450 |
| 2A | 4570 | | 7,9975 |
| 2B | 5790 | 1750 | 10,1325 |
| 2C | 7300 | | 12,7750 |
| 3A | 4570 | | 8,4545 |
| 3B | 5790 | 1850 | 10,7115 |
| 3C | 7300 | | 13,5050 |
| 4A | 4570 | | 8,9115 |
| 4B | 5790 | 1950 | 11,2905 |
| 4C | 7300 | | 14,2350 |
| 5A | 4570 | | 9,3685 |
| 5B | 5790 | 2050 | 11,8695 |
| 5C | 7300 | | 14,9650 |
| 6A | 4570 | | 9,8255 |
| 6B | 5790 | 2150 | 12,4485 |
| 6C | 7300 | | 15,6950 |
| 7A | 4570 | | 10,2825 |
| 7B | 5790 | 2250 | 13,0275 |
| 7C | 7300 | | 16,4250 |
| 8A | 4570 | | 10,7395 |
| 8B | 5790 | 2350 | 13,6065 |
| 8C | 7300 | | 17,1550 |
| 9A | 4570 | | 11,1965 |
| 9B | 5790 | 2450 | 14,1855 |
| 9C | 7300 | | 17,8850 |
| 10A | 4570 | | 11,6535 |
| 10B | 5790 | 2550 | 14,7645 |
| 10C | 7300 | | 17,6150 |
| 11A | 4570 | | 12,1105 |
| 11B | 5790 | 2650 | 15,3435 |
| 11C | 7300 | | 19,3450 |

| Двострука | | | |
|-----------|-------|-------|----------------|
| Тип | l_R | a_R | A_R |
| | mm | mm | m ² |
| 1A-D | 4570 | | 15,0810 |
| 1B-D | 5790 | 3300 | 19,1070 |
| 1C-D | 7300 | | 24,0900 |
| 2A-D | 4570 | | 15,9950 |
| 2B-D | 5790 | 3500 | 20,2650 |
| 2C-D | 7300 | | 25,5500 |
| 3A-D | 4570 | | 16,9090 |
| 3B-D | 5790 | 3700 | 21,4230 |
| 3C-D | 7300 | | 27,0100 |
| 4A-D | 4570 | | 17,8230 |
| 4B-D | 5790 | 3900 | 22,5810 |
| 4C-D | 7300 | | 28,4700 |
| 5A-D | 4570 | | 18,7370 |
| 5B-D | 5790 | 4100 | 23,7390 |
| 5C-D | 7300 | | 29,9300 |
| 6A-D | 4570 | | 16,6510 |
| 6B-D | 5790 | 4300 | 24,8970 |
| 6C-D | 7300 | | 31,3900 |
| 7A-D | 4570 | | 20,5650 |
| 7B-D | 5790 | 4500 | 26,0550 |
| 7C-D | 7300 | | 32,8500 |
| 8A-D | 4570 | | 21,4790 |
| 8B-D | 5790 | 4700 | 27,2130 |
| 8C-D | 7300 | | 34,3100 |
| 9A-D | 4570 | | 22,3930 |
| 9B-D | 5790 | 4900 | 28,3710 |
| 9C-D | 7300 | | 35,7700 |
| 10A-D | 4570 | | 23,3070 |
| 10B-D | 5790 | 5100 | 29,5290 |
| 10C-D | 7300 | | 37,2300 |
| 11A-D | 4570 | | 24,2210 |
| 11B-D | 5790 | 5300 | 30,6870 |
| 11C-D | 7300 | | 38,6900 |

Сл. С-29. Мерна скица и основне димензије степенасте механичке решетке

ЛИТЕРАТУРА

1. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ - НОРМАТИВНЫЙ МЕТОД
Энергия, Москва, 1973
2. Ђурић В.
ПАРНИ КОТЛОВИ - СВЕСКА 1
Грађевинска књига, Београд, 1969
3. Gulić M., Brkić Lj., Perunović P.
ПАРНИ КОТЛОВИ
Mašinski fakultet, Beograd, 1991
4. Вукалович М. П.
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА
Машиностроение, Москва, 1967
5. Ražnjević K.
ТОПЛИНСКЕ ТАБЛИЦЕ I DIJAGRAMI
"Đuro Đaković", SlavonSKI Brod, 1964
6. Козић Ђ., Бекавац В.
ПРИРУЧНИК ЗА ТЕРМОДИНАМИКУ
Машински факултет, Београд, 1967
7. Gumz W.
KURZES HANDBUCH DER BRENNSTOFF- UND FEUERUNGSTECHNIK
Springer Verlag, Berlin, 1942
8. Гольберг А. И., Корягин В. С., Мочан С. И., Тынтарев Э. М.
РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ ЭКРАНОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ
Энергия, Ленинград, 1975
9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОК С ТВЕРДЫМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ (дополнение к Нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов) - РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ
Ленинград, 1981
10. Бркић Љ.
ЗОНАЛНИ ТЕРМИЧКИ ПРОРАЧУН ПАРНОГ КОТЛА СА МОДИФИКОВАНИМ СИСТЕМОМ ПРИПРЕМЕ УГЉЕНОГ ПРАХА
Техника - Машинство 38 (1989), 541 - 547
11. Двойнишников В. А., Деев Л. В., Изюмов М. А.
КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ КОТЛОВ И КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК
Машиностроение, Москва, 1988
12. Канторович Б. В.
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА
Академия наук СССР, Москва, 1958
13. Кутателадзе С. С.
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА
Атомиздат, Москва, 1979
14. Левченко Г. И., Лисейкин И. Д., Копелиович А. М., Мигай В. К., Назаренко В. С.
ОРЕБРЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ
Энергоатомиздат, Москва, 1986
15. Радовановић М.
ГОРИВА
Машински факултет, Београд, 1994
16. Резняков А. Б. и др.
ГОРЕНИЕ НАТУРАЛЬНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА
Наука, Алма Ата, 1968
17. Роддатис К. Ф.
КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
Энергия, Москва, 1977
18. Сидельковский Л. Н., Юренив Б. И.
КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
Энергоатомиздат, Москва, 1988
19. Стырикович М. А., Катковская К. Я., Серов Е. П.
КОТЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ
Гсэнергоиздат, Москва - Ленинград, 1958
20. Хзмалян Д. М., Каган Я. А.
ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
Энергия, Москва, 1976