

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

В. І. Кузьменко, А. О. Окунь

**ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВАННЯ Й НАГРІВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ
КОВАЛЬСЬКО-ШТАМПУВАЛЬНИХ ЦЕХІВ**

Навчально-методичний посібник
для самостійної роботи і практичних занять
з курсу
«Технологія нагрівання й нагрівальні пристрої
ковальсько-штампувальних цехів»

для студентів освітньої програми
«Прикладна механіка»
денної і заочної форми навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 25.06.2020

Харків
НТУ “ХПІ”
2020

УДК 621.73.01

К 89

Рецензенти:

О. І. Тришевський, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Технології матеріалів» Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка

О. В. Акімов, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Ливарне виробництво» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Кузьменко В.І.

К 89 Технологія нагрівання й нагрівальні пристрої ковальсько-штампувальних цехів : навч.-метод. посіб. / В. І. Кузьменко, А. О. Окунь. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 128 с.

ISBN

У даному навчально-методичному посібнику розглянуто основні положення курсу «Технологія нагрівання й нагрівальні пристрої ковальсько-штампувальних цехів» та приклади виконання самостійної роботи із проектування полум'яних печей ковальсько-штампувального виробництва студентами, що обумовлює закріплення знань, отриманих студентами на лекційних заняттях і в процесі вивчення спеціальної літератури. Подано розрахунки до виконання роботи, індивідуальні завдання, приклади розрахунків для всіх етапів проектування нагрівальної печі, значний обсяг довідкових даних і визначено порядок виконання завдання й оформлення роботи.

Для студентів освітньої програми «Прикладна механіка» денної і заочної форм навчання.

Табл. 8. Іл. 40. Бібліогр. 20.

УДК 621.73.01

ISBN

© В. І. Кузьменко, А. О. Окунь, 2020 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ КУРСУ	8
1.1. Характеристики нагрівання	8
1.2. Паливо. Вид, склад і розрахунки горіння	10
1.2.1. Вид і склад палива	10
1.2.2. Теплота згоряння палива.....	10
1.2.3. Паливо для печей.....	13
1.3. Паливоспалювальні пристрої	14
1.3.1. Вимоги до горілок, форсунок і їх класифікація.....	15
1.4. Розрахунки нагрівання й охолодження металу	16
1.4.1. Температурні режими нагрівання сталевих виробів у печах.....	16
1.4.2. Аналіз розв’язання диференціального рівняння теплопровідності...	17
1.5. Вогнетривкі матеріали	18
1.5.1. Основні класифікаційні ознаки вогнетривких матеріалів.....	18
1.5.2. Вогнетривкі вироби.....	20
1.5.3. Будівельні матеріали	20
1.5.4. Метали.....	21
1.6. Елементи нагрівальних печей.....	23
1.6.1. Фундаменти й футеровка печей.....	23
1.6.2. Каркаси печей.....	24
1.6.3. Рами, заслінки робочих вікон і механізми підйому заслінок.....	24
1.7. Теплообмінні апарати	24
1.8. Полум’яні нагрівальні печі	25
1.8.1. Вимоги, що ставляться до печей. Класифікація печей.....	25
1.8.2. Камерні печі з постійною температурою робочого простору.....	26
1.9. Основи проектування печей	28
1.9.1. Вибір типу печі.....	28
1.9.2. Порядок проектування печей.....	30
1.9.3. Визначення основних розмірів печі	32
1.9.4. Ескіз печі.....	32
1.10. Визначення витрати палива. Тепловий баланс печі	33
Контрольні запитання	33
2. ДАНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ.....	35
2.1. Розрахунки горіння палива	35

2.1.1. Розрахунки горіння газоподібного палива.....	35
2.1.2. Розрахунки горіння рідкого палива.....	38
Контрольні запитання.....	42
2.2. Розрахунки часу нагрівання заготовки у камерній печі.....	43
2.2.1. Вибір температурного режиму кування.....	43
2.2.2. Критерій Біо.....	44
2.2.3. Визначення часу нагрівання.....	45
Контрольні запитання.....	48
2.3. Визначення розмірів робочого простору печі.....	48
Контрольні запитання.....	51
2.4. Вибір кладки. Компонування печі.....	51
2.4.1. Стіни.....	51
2.4.2. Звід.....	52
2.4.3. Под.....	52
2.4.4. Розміри вікна завантаження/розвантаження.....	53
2.4.5. Ескіз печі.....	53
Контрольні запитання.....	54
2.5. Тепловий баланс. визначення витрати палива.....	54
2.5.1. Прибуткові статті балансу.....	54
2.5.2. Видаткові статті балансу.....	54
2.5.3. Рівняння теплового балансу.....	58
Контрольні запитання.....	59
2.6. Основні техніко-економічні показники роботи печі.....	59
Контрольні запитання.....	60
3. ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС HEAT v3.5 Professional.....	61
3.1. Загальна характеристика.....	64
3.2. Характеристика програми.....	64
3.2.1. Загальний алгоритм роботи програми.....	66
3.2.2. Структура програми.....	66
3.3. Початок роботи.....	71
3.4. Камерний режим нагрівання.....	73
3.5. Методичний режим нагрівання.....	86
3.6. Марочник сталей.....	93
3.7. Робота з HEAT v3.5 Professional на прикладі.....	95
3.8. Збереження результатів.....	99
3.9. Робота з вихідними даними.....	100

3.10. Редактор властивостей сталей	100
Контрольні запитання	102
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	103
Додаток 1. Питома вага сталей.....	105
Додаток 2. Середня питома теплоємність сталей.....	106
Додаток 3. Варіанти завдань.....	107
Додаток 4. Приклад розрахунків	110

ВСТУП

Процеси штампування дозволяють отримувати високоякісні заготовки для машинобудівної галузі як у гарячому, так і в холодному стані. Значний вплив на якість гарячих поковок (кувань, штампувань) здійснює операція нагрівання, яка забезпечує підвищення пластичності й зниження зусилля штампування. Більшість процесів обробки металів тиском (ОМТ) здійснюється під час нагрівання, як і весь процес виробництва металевих виробів – від видобутку руди до виробництва готових виробів. Розрахунок режимів нагрівання й температурних полів дуже складний і базується на значних допущеннях, що знижує їхню точність і, як наслідок, якість металу, що нагрівається. При цьому на машинобудівних підприємствах до 30 % усього палива (енергії) споживається ковальськими цехами. Ресурси для економії палива значні, але тенденція великої частки підприємств на їх нерациональне використання зберігається дотепер.

В існуючих і проєктованих нових ковальсько-пресових цехах (КПЦ) досягнення стабільних техніко-економічних показників високого рівня пов'язано в основному з автоматизацією теплових процесів. Вона полягає в застосуванні пристроїв завантаження й вивантаження печей, автоматичній витримці заготовок у печі заданий час при заданій температурі, застосування різноманітних пристроїв контролю температурного режиму.

У зв'язку із цією необхідністю була розроблена реальна методика розрахунку, що дозволяє підвищити якість кінцевого результату й зберегти основні принципи процесу нагрівання заготовок.

Викладений у посібнику матеріал передбачає набуття студентами навичок розв'язку практичних завдань теплотехніки й виконання самостійної роботи із проектування полум'яних печей ковальсько-штампувального виробництва в процесі вивчення курсу «Технологія нагрівання й нагрівальні пристрої ковальсько-штампованих цехів», служить для закріплення знань, отриманих студентами на лекційних заняттях і в процесі вивчення спеціальної літератури. Навчально-методичний посібник містить рекомендації до виконання роботи, індивідуальні завдання, приклади розрахунків для всіх етапів проектування нагрівальної печі, значний обсяг довідкових даних, визначено порядок виконання завдань й оформлення роботи.

1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ КУРСУ

1.1. Характеристики нагрівання

Найважливіші характеристики нагрівання сталі – кінцева температура нагрівання, швидкість процесу, перепад (різниця) температур по перерізу заготовки або зливка. Вони визначають економічність процесу нагрівання і якість заготовок, що нагріваються.

Під температурою нагрівання сталі розуміють кінцеву температуру її поверхні в процесі нагрівання. Її величина визначається хімічним складом (маркою) сталі, і метою нагрівання, тобто нагрівання для термообробки або обробки металів тиском (гаряча або напівгаряча).

Термічну обробку використовують для одержання необхідних механічних властивостей сталевих заготовок, поковок і виробів. Процес термообробки полягає в нагріванні виробу до певної температури, витримці з метою вирівнювання температур по перерізу й наступному повільному або швидкому охолодженні. Температура нагрівання під термообробку нижча, ніж під обробку тиском. Для вуглецевих і малолегованих сталей вона не перевищує 900 °С.

Нагрівання під кування й штампування застосовують для підвищення пластичних властивостей сталі й зниження витрати енергії на формоутворення поковки. Слід ураховувати, що при передачі заготовок до преса або молота й у процесі обробки вони остигають, тому температура нагрівання сталі завжди повинна бути на 50–100 °С вище температури кування. Температура нагрівання сталі під кування коливається в межах 1150–1350 °С і визначається діаграмою стану сталі. Припустима температура нагрівання сталі залежить від її хімічного складу. При вмісті у вуглецевій сталі 1,1 % вуглецю температуру нагрівання беруть рівною 1100 °С. Для цієї сталі температура перепаду дорівнює 1180 °С. Якщо сталь містить 0,1 % вуглецю, то температура нагрівання підвищується до 1350 °С, а температура перепаду – до 1490 °С. Для практичного використання ці дані наведені в довідниках з кування й об'ємного штампування. Підвищення температур нагрівання обмежується небезпекою перегріву або перепаду сталі, тобто одержання браку кування, який можливо виправити або неможливо [1, 2].

Перегрів виникає при нагріванні в області гранично допустимих

температур і наступній витримці, що приводить до росту зерен і зниження механічних властивостей сталі. Схильність сталі до перегріву залежить від її хімічного складу: мало схильні до перегріву сталі, леговані алюмінієм, ванадієм і цирконієм. Структуру перегрітих сталевих заготовок можна виправити наступною термічною обробкою (нормалізацією або термополіпшенням) або додатковою пластичною деформацією.

Причиною перепалу є висока температура нагрівання (перевищуюча допустиму) і тривала витримка. У результаті цього відбувається окиснення заліза й оплавлення легкоплавких евтектик на границях зерен, зв'язок між зернами слабшає, сталь втрачає пластичність, стає крихкою й втрачає суцільність у випадку наступного кування. Перепалені заготовки відправляють на переплавлення в сталеплавильні цехи (невиправний брак).

Велике значення має також швидкість нагрівання, тобто швидкість зміни температури тіла. Розрізняють швидкість нагрівання в цей момент часу й за який-небудь період. Процес нагрівання слід проводити з максимально допустимою швидкістю, що забезпечує підвищення продуктивності печі, зниження окиснення й зменшення витрати палива. Підвищення температури пічних газів і збільшення коефіцієнта теплопередачі дозволяє прискорити нагрівання в полум'яних печах. Коефіцієнт теплопередачі можна збільшити, наприклад, за рахунок збільшення швидкості руху газового потоку, інтенсивної циркуляції теплоносія уздовж поверхні тіла або переходу до променистого теплообміну, шляхом використання радіаційних пальників, випромінюючих від зводу й поду.

Нагрівання заготовок здійснюють у спеціальному тепловому пристрої, іменованому піччю. Конструкції печей різноманітні. Дана робота присвячена нагріванню заготовок у полум'яних печах, тобто таких, у яких як джерела тепла використовують рідке й газоподібне паливо. Заготовки для штампування поковок машинобудівного виробництва мають відносно невеликі розміри й виготовляють їх в основному з вуглецевих, низько- і середньолегованих сталей, що дозволяє віднести їх до термічно «тонких» або близьких до них тіл, які нагрівають із використанням камерного режиму, при постійній температурі робочого простору печі. Заготовки більших розмірів, а також заготовки з високолегованих сталей нагрівають із використанням методичного й напівметодичного режимів нагрівання.

Розрахунки й проектування печі містять у собі: розрахунки горіння палива, визначення температури горіння, розрахунки часу нагрівання, компоновання й визначення розмірів робочого простору печі, вибір вогнетривких матеріалів і кладки печі, використання вторинного тепла, обчислення основних зовнішніх розмірів печі й теплового балансу з основними показниками роботи спроектованої печі і її ескіз.

1.2. Паливо. Вид, склад і розрахунки горіння

1.2.1. Вид і склад палива

Паливо – горюча речовина, що виділяє при згорянні значну кількість теплоти й використовується як джерело одержання енергії.

Паливо за агрегатним станом розділяють на тверде, рідке й газоподібне. Воно може бути природним, використовуваним у тому стані, у якому воно перебуває в природі, і штучним, переробленим із природних видів палива.

До твердого природного палива, застосовуваного для опалення різних печей, відносять дрова, торф, антрацит, буре й кам'яне вугілля; до твердого штучного палива – деревне вугілля, кокс, термоантрацит, брикети й пил з бурого й кам'яного вугілля. Як рідке штучне паливо використовують мазут і різні смоли. Газоподібне паливо може бути природним, наприклад природний газ, і штучним, наприклад газ, одержуваний в доменних печах (доменний або колошниковий), у коксових печах (коковий) і в газогенераторах (генераторний).

Для опалення ковальських, прокатних і термічних печей використовують тільки газоподібні й рідкі палива.

1.2.2. Теплота згорання палива

Теплотою називають ту кількість теплоти Q , кДж, яка виділяється при повному згорянні 1 кг рідкого або 1 м³ газоподібного палива.

Залежно від агрегатного стану вологи у продуктах згорання розрізняють вищу й нижчу теплоту згорання. Якщо в продуктах згорання волога перебуває в рідкому вигляді, то теплота згорання буде вищою Q_v , а при пароподібному стані вологи теплота згорання буде нижчою Q_n .

Волога у продуктах згорання рідкого палива утворюється при горінні водню H^p , а також при випарюванні початкової вологи палива W^p . У

продукти згоряння потрапляє також і волога повітря, що використовується для горіння. Однак її зазвичай не враховують. При вмісті в паливі H^p кг водню при горінні утворюється $9H^p$ кг води. При цьому у продуктах згоряння утримується $(9H^p + W^p)$ кг води. На перетворення 1 кг води в пароподібний стан витрачається ~ 2500 кДж теплоти. Якщо конденсації парів води не відбудеться, то теплота, витрачена на випарювання води, не буде використана. У цьому випадку одержимо нижчу теплоту згоряння. Зазвичай в печах температура газів значно вище температури конденсації водяних парів. Тому основною характеристикою палива буде нижча теплота згоряння.

Теплота згоряння (кДж) може бути віднесена до будь-якої маси палива, але найчастіше її відносять до робочої маси.

Можна записати, що

$$Q_n^p = Q_b^p - 25(H^p + W^p).$$

У цій формулі вміст H^p і W^p виражений у відсотках, тому співмножник перед дужками зменшений у 100 разів. Аналогічним чином можна виразити різницю між вищою й нижчою теплотою згоряння газоподібного палива.

Існує два методи визначення теплоти згоряння: експериментальний і розрахунковий.

При експериментальному визначенні теплоти згоряння навіску палива спалюють у приладах, які називають калориметрами. Теплота, що виділяється при горінні палива, поглинається водою. Знаючи масу води, за зміною її температури можна обчислити теплоту згоряння. Перевага методу – його простота. Для визначення теплоти згоряння за цим методом досить мати дані технічного аналізу.

При використанні розрахункового, більш швидкого методу теплоту згоряння визначають за формулами, але для цього потрібні дані елементарного аналізу. Існує велика кількість формул, але для рідкого й твердого палива частіше використовують формулу Д. І. Менделєєва

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p + S^p) - 25W^p \text{ кДж/кг},$$

де C^p , H^p , O^p , S^p і W^p – відповідно вміст вуглецю, водню, кисню, сірки й води в робочому паливі, %.

Формула враховує той факт, що невелика частина вуглецю й водню перебуває в паливі в поєднанні з іншими елементами, утворюючи негорючі з'єднання.

Формула для визначення теплоти згоряння газоподібного палива побудована за таким же простим принципом, що й формула Д. І. Менделєєва. За нею підсумовується кількість теплоти, що виділяється при горінні окремих складових палива. Природно, що кількість теплоти, що виділяється, залежить не тільки від величини теплового ефекту реакції горіння того або іншого компонента, але й від його кількості в паливі. Тому в правій частині формули перебувають члени, що являють собою добуток теплового ефекту реакції горіння на вміст газу в паливі у відсотках.

Для газоподібного палива теплота згоряння, кДж/м³

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 127\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 590\text{C}_m\text{H}_n + 560\text{C}_2\text{H}_2 + 636\text{C}_2\text{H}_6 + \\ + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10} + 1465\text{C}_5\text{H}_{12} + 234\text{H}_2\text{S}.$$

Якщо в природному газі міститься до 3 % C_mH_n (неграничних вуглеводнів невідомого складу), то їх можна прийняти за етилен (C_2H_4). Тому в формулу буде входити доданок $590\text{C}_m\text{H}_n$.

У коксовому газі склад неграничних вуглеводнів складніше. Вони мають підвищену теплоту згоряння. Тому при їхньому вмісті до 3 % у формулу вводять доданок $710\text{C}_m\text{H}_n$.

Значення теплоти згоряння газу, обчислене за формулою, дещо менше значення, обчисленого за допомогою калориметра. При обчисленнях за формулою не враховується наявність у газах смол і парів рідких вуглеводнів.

Різні види палива мають різну теплоту згоряння. Для нормування й обліку витрати палива використовують поняття умовного палива.

Умовним прийнято називати паливо з нижчою теплоотою згоряння (29 310 кДж/кг). Для переведення будь-якого палива в умовне слід розділити його теплоту згоряння на 29 310 кДж/кг, тобто знайти еквівалент даного палива: для мазуту він дорівнює 1,37–1,43, для природних газів 1,2–1,4.

1.2.3. Паливо для печей

Мазут. Для опалення печей використовують мазут, що є продуктом переробки нафти. Середній склад мазуту: 85–80 % C^T; 10–12,5 % H^T; 0,5–1,0 % (O^T + N^T); 0,4–2,5 % S^T; 0,1–0,2 % A^P; 2 % W^P. Теплота згоряння мазуту дорівнює 39–42 МДж/кг. Залежно від відсоткового вмісту сірки мазут підрозділяють на малосірчистий (<0,5 % S^P), сірчистий (0,5–1 % S^P) і високосірчистий (>1 % S^P). Вміст вологи в мазуті, що відправляється з нафтоперегінного заводу, не повинен перевищувати 2 %.

Мазут підрозділяють також за вмістом парафіну й за способом переробки нафти. Розрізняють мазут прямої перегонки – малов'язкий і крекінг-мазут, що має підвищену в'язкість. Залежно від в'язкості; мазут класифікують за марками. Номер марки мазуту показує умовну в'язкість при температурі 50 °С (ВУ₅₀). В'язкість визначають за допомогою приладів-віскозиметрів. За умовну в'язкість приймають співвідношення часу витікання 200 см³ нафтопродукту при температурі випробування до часу витікання такого ж обсягу води, що має температуру 20 °С. За цим показником мазут підрозділяють на марки 40, 100, 200 і МП (мазут для мартенівських печей).

Зі збільшенням номера марки мазуту збільшується його щільність, яка становить 0,95–1,05 г/см³ при 20 °С; з підвищенням температури щільність зменшується.

Розглянемо деякі властивості мазуту. Щільність мазуту впливає на спосіб підготовки його до спалювання, що полягає у відстої й фільтрації мазуту для відділення води й механічних домішок (піску, глини і т.д.). Мазут відокремлюють від води при підвищеній температурі, вибір якої залежить від його марки й щільності. В'язкість і щільність мазуту при нагріванні зменшуються, внаслідок чого він спливає нагору. Унизу ємності накопичується волога, угорі – збездоднений мазут.

В'язкість мазуту має велике значення при його зливанні із залізничних цистерн, при подачі трубопроводами із заводських і цехових ємностей до печей, а також при розпилюванні форсунками. Мазут зазвичай спалюють у розпиленому стані за допомогою форсунок.

На перекачування й розпилення мазуту витрачається тем менше енергії, чим нижче його в'язкість, що залежить від температури; чим вище температура, тим нижче в'язкість. Температуру вибирають за графіками в'язкості, виходячи із забезпечення умовної в'язкості мазуту 5–10 одиниць.

Недогрівання в'язкого мазуту ускладнює його використання, а перегрівання сильно обводненого мазуту викликає його вспінювання, що небезпечно з погляду техніки безпеки й може призвести до пульсуючого горіння.

При розігріванні треба враховувати температуру спалаху мазуту, тобто температуру нагрівання, при досягненні якої починається інтенсивне виділення летючих складових, здатних загорятися від іскри або полум'я. Вона зазвичай змінюється в межах 80–190°. Температуру спалаху слід відрізнити від температури займання, під якою розуміють температуру нагрівання, при досягненні якої (500 °С) мазут довільно займається й при сприятливих умовах продовжує горіти.

Газоподібне паливо. Це паливо має багато переваг у порівнянні з рідким паливом. Підігріваючи газ і повітря, що надходять на горіння, можна одержати високу температуру горіння. Процес спалювання газу легко автоматизується. При використанні газоподібного палива полегшується керування складом пичної атмосфери, поліпшуються санітарно-гігієнічні умови роботи обслуговуючого персоналу. Однак при цьому підвищуються вимоги техніки безпеки.

Печі опалюють природним газом і газом, який одержується при видобуванні й перероблянні нафти. Крім того, печі металургійних заводів опалюють доменним і коксовим газами і їх сумішами.

Природний газ добувають із чисто газових родовищ або разом з нафтою (супутній газ). У першому випадку основною горючою складовою є метан, вміст якого може доходити до 95–98 %. Супутні гази крім метану містять значні кількості інших вуглеводнів: етан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} і ін. Супутні гази мають високу теплоту згорання, але як паливо їх використовують рідко. Застосовують їх переважно в хімічній промисловості.

Природний газ, що видобувається з газових родовищ, – найдешевше паливо.

1.3. Паливоспалювальні пристрої

Нагрівання заготовок, поковок, деталей у полум'яних печах здійснюється за рахунок теплоти, що виділяється в результаті згорання палива (газоподібного, рідкого), яке спалюють за допомогою спеціальних паливоспалювальних пристроїв: горілок і форсунок.

1.3.1. Вимоги до горілок, форсунок і їх класифікація

Горілка для газу й форсунки для мазуту призначені для введення палива й повітря в топку або у робочий простір печі, перемішування пального з киснем і займання горючої суміші.

Найважливішим завданням паливоспалювальних пристроїв є забезпечення умов утворення горючої суміші палива з повітрям.

Процес горіння мазуту більш складний, ніж процес горіння газоподібного палива. Мазут – суміш складних рідких вуглеводнів при горінні, як і газоподібне паливо, зазнає своєрідної «газифікації» з утворенням активних центрів.

При горінні рідкого палива можна виділити такі стадії: розпилення палива й змішування його з повітрям, підігрівання суміші й випарювання легких фракцій, термічне розщеплення й горіння газової фази. Ці стадії взаємозалежні між собою й у якійсь мірі сполучені. Для створення умов повної «газифікації» мазуту необхідно, щоб процес нагрівання й випарювання крапель палива протікав швидко й при необхідній кількості кисню. Недотримання цих умов може призвести до повного розкладання вуглеводнів з утворенням важкоспалюваних великих часток сажистого вуглецю. Тонке розпилення мазуту різко зменшує розмір окремих крапель, що прискорює їх прогрівання, випарювання і горіння.

Таким чином, паливоспалювальні пристрої в першу чергу повинні забезпечити створення нормальних наведених вище умов горіння різних типів палива. Розроблена велика кількість різних конструкцій горілок і форсунок, серед яких потрібно вибрати найбільш ефективні для конкретного пічного агрегату.

Газові горілки за способом перемішування підрозділяють на полум'яні (без попереднього перемішування) і безполум'яні (з попереднім перемішуванням). Горілки також класифікують і за іншими ознаками, наприклад за тиском газу або за конструктивними особливостями.

У характеристику горілок включають:

- 1) робочий тиск газу;
- 2) робочий тиск повітря;
- 3) розміри горілки;
- 4) розміри факела, що утворюється, дозволяють визначити його границі й тепловіддачу.

Придатність горілок визначається допустимими межами регулювання їх продуктивності, границі якої залежать від стійкості процесу горіння за умовами відриву факела від горілки при великих навантаженнях і від стійкості горілки за умовами обгорання при затягуванні факела в її устя при малих навантаженнях. Особливо важливі ці дані, коли вибирають горілки для роботи в системі автоматичного регулювання процесу спалювання палива.

1.4. Розрахунки нагрівання й охолодження металу

1.4.1. Температурні режими нагрівання сталевих виробів у печах

Під режимом нагрівання розуміють закон зміни температури печі в процесі нагрівання. Він визначає швидкості нагрівання виробів до заданої температури, кількість, тривалість і температури витримувань, а також загальну тривалість процесу [5–17].

Режим визначається маркою сталі, формою й розмірами виробів, їх розташуванням відносно один одного, конструкцією й призначенням печі.

У практиці нагрівання сталевих виробів і злитків відомі одно-, дво-, три- і багатоступінчасті режими нагрівання. Вибір того або іншого режиму значною мірою визначається величиною термічних напруг, що виникають при нагріванні внаслідок неоднорідного температурного поля по перерізу виробу.

Нагрівання тіл супроводжується збільшенням їх об'єму. Зовнішні шари, що мають температуру, більшу, ніж середні, прагнуть розширитися, але за рахунок впливу на них внутрішніх шарів перебувають у стисненому стані. Внутрішні шари мають температуру нижче середньої, тому будуть розтягуватися. Отже, причина виникнення температурних напруг – температурний градієнт по перерізу тіла. Величина напруг залежить також від механічних властивостей сталі.

Крім температурних напруг, у виробі можуть бути й структурні напруги, обумовлені структурними перетвореннями в металі.

Термічні напруги, що виникають при нагріванні тонких тіл, незначні. Тому швидкість нагрівання в цьому випадку може бути максимальною. Режим, що задовільняє цій умові, характеризується постійною температурою середовища нагрівання, або в часі, або за довжиною робочого простору. Такий режим називають одноступінчастим. Його

доцільно застосовувати для нагрівання термічно тонких тіл у сучасних механізованих і автоматизованих прохідних печах.

Виникнення температурних напруг у термічно масивних тілах особливо небезпечно при нагріванні до температур порядку 500 °С, доки сталь не стає пластичною, тому швидкість нагрівання необхідно знижувати в зазначеному температурному інтервалі з метою одержання потрібного градієнта температур по перерізу виробу, що досягається застосуванням двоступінчастого режиму. Він характеризується зниженою температурою печі на початку процесу й повільним її підвищенням до настання пластичного стану сталі. У перший період температура печі повільно підвищується від мінімальної до максимальної. Швидкість підвищення температури печі визначається маркою сталі й розмірами виробів. Після досягнення пластичності виріб нагрівають при максимальній температурі печі, але так, щоб до кінця нагрівання перепад температур по перерізу Δt не перевищував заданого значення.

За двоступінчастим режимом працюють методичні ковальські печі, ковальські печі для нагрівання садок середніх і великих заготовок або злитків, печі з висувними подами.

Триступінчастий режим застосовується для нагрівання дуже великих злитків у камерних печах або для нагрівання заготовок у сучасних високопродуктивних печах. Тут крім періоду повільного нагрівання, періоду прискореного нагрівання є ще період витримування, призначений для зменшення перепаду температур по перерізу й реалізований при зниженій температурі печі.

Температурний режим печі обов'язково пов'язаний з тепловим, з подачею в піч палива або електроенергії у визначеній кількості для всіх стадій або періодів нагрівання.

1.4.2. Аналіз розв'язання диференціального рівняння теплопровідності

У теорії теплопровідності відома формула для розрахунків тривалості нагрівання термічно тонких тіл

$$\tau = (scp/ak_1) \cdot \ln \left[(t_{\text{поч}} - t_{\text{печ}}) / (t_{\text{поч}} - t) \right],$$

де k_1 – коефіцієнт форми (для пластини $k_1 = 1$, а для циліндра $k_1 = 2$); S – товщина нагрівання, $S = R$ – при нагріванні циліндричних заготовок;

c – середня питома теплоємність; ρ – середня питома вага; a – середній коефіцієнт передачі тепла на поверхню заготовки, що нагрівається; $t_{\text{печ}}$ – температура робочого простору печі; $t_{\text{поч}}$ – початкова температура заготовки; t – кінцева температура заготовки.

Із цього рівняння видно, що час нагрівання або охолодження термічно тонких тіл пропорційний s або R , тобто лінійному розміру тіла, і що при $s = R$ циліндр нагрівається або охолоджується в 2 рази швидше пластини. Цими рівняннями можна користуватися до значень $Bi \leq 0,25$.

Рівняння придатне й для тіл іншої форми, якщо ввести до нього відповідне значення величини k_1 .

Знання часу нагрівання й основних розмірів заготовки, що нагрівається, дозволяє здійснити компонування заготовок на поді печі й визначити розміри поду й робочого простору печі.

Переходимо до вибору вогнетривких і будівельних матеріалів, а потім і до компонування печі.

1.5. Вогнетривкі матеріали

1.5.1. Основні класифікаційні ознаки вогнетривких матеріалів

Неметалеві матеріали з вогнетривкістю не нижче 1580 °С називають вогнетривкими. Вони призначені для використання в теплових агрегатах і пристроях як захист від впливу високих температур і агресивних середовищ (газових, рідких, твердих).

Залежно від специфіки виробництва, вироби з вогнетривків повинні бути досить міцними, мати високу температуру плавлення, не руйнуватися при різких змінах температури, не взаємодіяти зі шлаками й газами, мати потрібну теплопровідність, точні розміри й необхідну форму. Чисельність вимог і складність їх виконання обумовили створення великої кількості різних видів вогнетривків. Це визначає необхідність їх класифікації. У цей час вогнетриви підрозділяють на вогнетривкі вироби (формовані), що мають певну геометричну форму, розміри, і неформовані вогнетриви.

Залежно від області застосування вогнетриви підрозділяють на два види: загального призначення й для визначених теплових агрегатів і пристроїв, що розглянуті у цій роботі.

Вогнетривкі вироби за спеціальними ознаками класифікують залежно від способу зміцнення, способу формування, за формою й розмірами, а також від способу додаткової обробки вогнетривків.

Вогнетривкі вироби залежно від способу зміцнення бувають:

- бетонні, які складаються з вогнетривкого заповнювача, зв'язування (гідратаційного або хімічного) і пластифікуючих добавок, що регулюють швидкість схоплення й твердіння; структуроутворюючих добавок і т.д. Вони знаходять задані властивості в результаті твердіння при нормальній температурі або нагріванні не вище 600 °С;

- безвідпалювальні, які складаються з вогнетривких компонентів і зв'язування (коагуляційного або органічного). Вони набувають заданих властивостей при сушінні або коксуванні при температурі не вище 600 °С;

- відпалені, піддані спіканню в процесі відпалювання при температурі, що забезпечує задані властивості;

- гарячепресовані, піддані спіканню в процесі пресування;

- затверділі з розплаву.

У свою чергу, вогнетривкі бетонні й безвідпалювальні вироби підрозділяють залежно від типу зв'язування.

Вогнетривкі вироби в класифікації за спеціальними ознаками підрозділяють також залежно від способу формування. Напівсухим способом формування виготовляють вироби з порошкоподібних, малопластичних або непластичних мас (у тому числі із плавлених матеріалів) методами механічного, гідравлічного, ізостатичного пресування, вібропресування, трамбування, віброущільнення й т.п.

Виготовляють вогнетривкі вироби із пластичних мас пластичним формуванням (видавлюванням, допресуванням, термопластичним пресуванням та ін.); литтям і вібролиттям з текучих мас; гарячим пресуванням. Сюди ж відносять плавленолиті вогнетриви й пиляні із природних гірських порід або попередньо виготовлених блоків.

За формою й розмірами вогнетривкі вироби (з урахуванням їх маси) підрозділяють на прямі нормальних розмірів 230×(114; 115)×(65; 75) мм; клинові нормальних розмірів 230×(114; 115)×65(55)×65(45)×75(65)×75(55); дрібноштучні різного призначення масою переважно менше 1 кг; фасонні вироби простої, складної й особливо складної конфігурації; прямі й клинові спеціальні вироби; вироби, що мають інші елементи складності (пази, шпунти, отвори, криволінійні поверхні та ін.); рулонні й листові вироби; блокові вироби масою від 10 до 1000 кг; великоблочні вироби масою понад 1000 кг.

1.5.2. Вогнетривкі вироби

Технологія виготовлення вогнетривких виробів включає процеси: обробка сировини (подрібнювання, збагачення); підготовка маси; формування (лиття, гаряче пресування); сушіння цегли-сирцю; відпалювання виробів; твердіння (зміцнення залежно від виду зв'язування).

Найбільше розповсюджені алюмосилікатні вироби: напівкислі, шамотні, муліто-кремнеземисті, мулітові, муліто-корундові. При нагріванні під кування (штампування) частіше застосовують шамотні й напівкислі вогнетривкі матеріали. Вогнетривка основа шамотних і напівкислих вогнетривків – муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), кремнезем (SiO_2) і корунд (Al_2O_3).

Шамотними називають вогнетривкі вироби із вмістом Al_2O_3 від 28 % до 45 %, отримані з вогнетривких глин (або каолінів), змішаних із шамотом, тобто з попередньо відпаленими в шматках і подрібненими тими ж глинами. Чим більше Al_2O_3 у глині, тим вище вогнетривкість виробів.

Вогнетриви, у складі яких більше 80 % шамоту, застосовують для виготовлення виробів, які повинні мати високу щільність, міцність і мале осадження (0,5–1 %). Шамотні вироби за вогнетривкістю поділяють на класи: А – має вогнетривкість не нижче 1730 °С; Б – 1670 °С і В – 1610 °С. Однак через великий температурний інтервал, у якому відбувається втрата механічної міцності під навантаженням, граничні робочі температури шамоту прийняті 1350–1450 °С. Муліто-кремнеземисті вироби мають поліпшені властивості в порівнянні зі звичайними шамотними.

1.5.3. Будівельні матеріали

Крім вогнетривких і теплоізоляційних виробів для промислових печей застосовують будівельну (червону) цеглу. Її використовують для будівництва фундаментів, боровів, вистилки подів, низькотемпературних печей і сушилок. Для футерування стовбурів димарів застосовують спеціальну лекальну цеглу. Допустима температура застосування будівельної цегли 600 °С, середній коефіцієнт теплопровідності 0,8 Вт/(м·К), об'ємна маса 1800 кг/м³.

Силікатну цеглу використовують для будівництва димарів низькотемпературних печей, а клінкерну – для футерування боровів і димарів, температура газів у яких до 900 °С.

Бутовий камінь (масою 15–40 кг) одержують зі шматків гірських порід. Пісковиковий камінь застосовують до температур 600 °С, а вапняний – до 200 °С. З них будують фундаменти печей, підпірні стінки й різні комунікації.

Звичайні будівельні бетони виготовляють із цементу, води й заповнювача (піску, щебню, гравію). Міцність заповнювача повинна бути вища ніж міцність проектованого бетону. Основа бетонної суміші – цемент. Найбільш широке розповсюдження одержав портландцемент. З марок портландцементу 200, 250, 300, 400, 500 і 600 останні – кращі. На базі портландцементів готують бетони з особливими властивостями: щільні, водонепроникні, морозостійкі, пластифіковані та ін.

Для ізоляції від ґрунтових вод у печних конструкціях використовують гідроізоляційні матеріали: толь, покрівельний картон, просякнутий м'якими нафтовими бітумами, борулін (азбестове волокно, просякнуте бітумами) та ін. Для захисту від атмосферної корозії каркасів печей, повітро- і газопроводів застосовують лаки (наприклад, масляний), для гарячих поверхонь – фарби.

1.5.4. Метали

Маловуглецеві й середньовуглецеві сталі використовують у пічобудуванні для зведення зовнішніх металоконструкцій (каркасів, кожухів печей, майданчиків і т.п.). Сталі марки Ст2, Ст3 та ін. застосовують у вигляді сталевих листів товщиною від 4 до 30 мм (для особливо відповідальних кожухів печей). Звичайні сталі й чавуни використовують при температурах до 300–400 °С. З підвищенням температури відбувається інтенсивне окиснення металу, і умови експлуатації вузлів і деталей печей ускладнюються. Тому виникає необхідність застосування легованих і високолегованих сталей і сплавів.

До високолегованих сталей умовно належать сплави із вмістом у них заліза більше 45 %, а легуючих елементів (у сумі) не менше 10 % при вмісті одного з елементів не менш 8 % за нижньою межею.

Залежно від основних властивостей сталі й сплави підрозділяють на групи. Найбільш застосовувані для промислових печей – сталі й сплави жаростійкі (група II) і жароміцні (III).

Жаростійкі (окалиностійкі) сталі й сплави мають стійкість проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах при температурах

вище 550 °С і можуть працювати в ненавантаженому або слабконавантаженому стані. До них відносять хромисті сталі. При вмісті хрому від 6 до 14 % сталі 15Х5, 30Х13 мають обмежений опір окисненню до 700 °С. При збільшенні Cr > 15 % опір сталі 6Х18 зростає, і її можна застосовувати до 900 °С. Сталі із вмістом вуглецю (до 0,15 %) добре обробляються, але значно піддані повзучості, що обмежує їхнє застосування під навантаженням. Підвищення вмісту хрому до 25–30 % у сталях 15Х28, 15Х25Т збільшує опір окисненню, але їх механічна міцність того ж порядку. Теплопровідність хромистих сталей менша, ніж у звичайних вуглецевих. Теплопровідність малолегованих сталей зменшується з підвищенням температури. Питомий електричний опір високохромистих сталей набагато більший, ніж вуглецевих. Середньолеговані сталі добре зварюються електродами того ж складу, але вимагають спеціальних флюсів і відпалу зварних швів. Високохромисті сталі краще зварювати в підігрітому стані хромонікелевими електродами. Литі хромисті сталі мало відрізняються від кованих сплавів. Зі збільшенням вмісту вуглецю матеріал стає твердішим, і при C ≈ 1 % відливки дуже важко обробляти.

Таким чином, хромисті сталі можуть застосовуватися там, де головним чином потрібен опір окисненню, причому при температурах вище 800 °С їх можна застосовувати тільки в ненавантаженому стані.

Значне поліпшення оброблюваності сталей, їх механічних властивостей при високих температурах, особливо червоностійкості, одержують шляхом додавання нікелю в хромисті жаростійкі сталі.

Для деталей, що працюють у печах під значним навантаженням (конвеєри, піддони, ролики та ін.), використовують сталі й сплави жароміцні, до них відносять хромонікелеві сталі. У печах з температурою до 800 °С можна застосовувати хромонікелеві сталі, які відрізняються одна від одної вмістом вуглецю, а також титану (до 0,8 %). Теплоємність цих сталей суттєво залежить від температури, і при нормальній температурі дорівнює $5 \cdot 10^2$ Дж/(кг·К). Теплопровідність збільшується з температурою і може бути описана виразом, Вт/(м·К): $\lambda = 15,5 + 15,1 \cdot 10^{-3} T$. Найбільш застосовуваними з високолегованих хромонікелевих сталей є сталі 20Х13Н18, 36Х28Н25С2, 20Х25Н20С2 з робочою температурою до 1100 °С. Хромонікелеві сталі добре зварюються автогеном і електрозварюванням.

1.6. Елементи нагрівальних печей

Усі промислові печі, включаючи й електричні, фактично складаються з тих самих елементів: фундаменту, каркаса, футеровки (кладки), робочих вікон, рам, заслінок, внутрішніх металоконструкцій для транспортування через піч виробів, що нагріваються, пристроїв для генерації теплоти й різних механізмів.

1.6.1. Фундаменти й футеровка печей

Фундаменти сприймають і рівномірно розподіляють навантаження від печі й металу на ґрунт, яке часто не перевищує 100 кПа. Тому зазвичай розрахунки фундаменту на міцність не проводять.

Футеровкою (кладкою) печі називають захисний шар для різних елементів печі, що складається з вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, який повинен задовольняти технологічні і теплотехнічні особливості роботи печі. Основними є вимоги до термічної стійкості і вогнетривкості футеровки. Ці й інші властивості матеріалів, використовуваних для футеровки печей, розглянуті у главі 6.

Футеровку оцінюють не тільки за використовуваними матеріалами, але й за якістю виготовлення, терміном служби, вартістю, за втратами теплоти у зовнішнє середовище й за іншими показниками.

У проекті печі футеровку поду, зводу, стін і інших елементів розраховують і вибирають таким чином, щоб була забезпечена будівельна стійкість кладки, її газощільність і мінімальні втрати теплоти з метою підвищення ККД печі.

Футеровку стін і елементів печі виконують цегельною, великоблочною, панельною (наприклад, з волокнистих матеріалів), литою – з жаростійких бетонів і набивних мас. Найбільш прогресивні й ефективні – бетонні й панельні футеровки.

Стіни печей футерують не менше ніж у два шари. Внутрішній шар, що обрамляє робочий простір печі, виконують із вогнетривкого матеріалу, що має необхідні робочі властивості, а зовнішній – теплоізоляційний, відрізняється низькою теплопровідністю й невисокою щільністю.

Розміри кладки в кожному конкретному випадку визначають виходячи з техніко-економічних міркувань або на основі практичних даних. У всіх випадках слід прийняти за правило, що товщина вогнетривкого шару кладки повинна бути мінімальною, з обов'язковим

підбором ефективної теплоізоляції. Мінімальна товщина облицювання повинна визначатися гранично допустимою температурою на стику вогнетривкого й теплоізоляційного шарів, а також будівельною міцністю вогнетривкого шару.

1.6.2. Каркаси печей

Для запобігання кладки печі від руйнування при тепловому розширенні необхідно скріплювати її міцним каркасом, який зводять зазвичай на фундаменті. Каркаси залежно від їхньої конструкції бувають із гнучкими або жорсткими зв'язками, а каркаси-кожухи створюють для забезпечення більшої герметичності робочого простору. В останньому випадку по зовнішній поверхні стін розміщують сталеві листи, що утворюють кожух.

1.6.3. Рами, заслінки робочих вікон і механізми підйому заслінок

Будь-яка піч має робочі вікна для завантаження й вивантаження виробів. Віконний проріз перекривають арками в один або два шари (окати).

Вікна закривають заслінками, які завжди мають більшу масу. Щоб не пошкодити кладку при підйомі заслінки, ззовні віконного прорізу встановлюють рами, які мають нахил до вертикалі 4–5°, що забезпечує щільне прилягання заслінки до рами. Рами виготовляють литими із чавуну або звареними. Останні можуть бути й водоохолоджуваними.

1.7. Теплообмінні апарати

Для опалення нагрівальних і термічних печей витрачають значну кількість природного газу й мазуту. Печі ці працюють із досить низьким термічним ККД (20–40 %) внаслідок більших втрат тепла із продуктами, що відходять від згоряння, вони досягають іноді 65 % від загальної кількості підведеного в піч палива.

Ефективний спосіб підвищення термічного ККД печі – повернення в робочий простір теплоти, яка виноситься димовими газами, що відходять. Здійснюють це шляхом нагрівання в рекуператорах повітря або газу, використовуваних для опалення печі. Рекуператори встановлюють на шляху відводу димових газів над зводом або в боровах печей. У рекуператорах тепло від гарячого середовища (димових газів) передається іншому, холодному середовищу (повітрю, горючому газу).

До теплообмінних апаратів, використовуваних для нагрівання повітря,

відносять і регенератори. Їх установлюють головним чином у сталеплавильних і великих нагрівальних печах для підігріву повітря й газу до високих температур. Регенератори коштовні, складні у виготовленні й керуванні.

Підігрів повітря забезпечує економію палива за рахунок внесення фізичної теплоти в піч. При цьому підвищується теоретична температура горіння палива, що підсилює тепловіддачу від газів до виробів, які нагріваються, і тим самим збільшує продуктивність печі.

1.8. Полум'яні нагрівальні печі

1.8.1. Вимоги, що ставляться до печей. Класифікація печей

Промислова піч – енергетичний і технологічний агрегат, у якому в результаті горіння палива або перетворення електроенергії виділяється теплота, використовувана для теплової обробки матеріалів або виробів.

Печі повинні задовільняти таким основним вимогам:

- 1) забезпечення високої продуктивності при заданих технологічних умовах нагрівання (температурі, перепаді температур по перерізу й ін.);
- 2) мінімальна питома витрата палива;
- 3) можливості зміни продуктивності й сортаменту виробів, що нагріваються;
- 4) наявність механізації завантаження й вивантаження виробів;
- 5) простота й безпека обслуговування й ремонтів;
- 6) можливість автоматичного керування піччю.

У ковальських цехах використовують велику кількість різноманітних печей, тому їх класифікують за технологічними, конструктивними або іншими ознаками.

За технологічними ознаками печі підрозділяють на прокатні, ковальські (для нагрівання металу під кування й штампування й термічні).

За конструктивними особливостями печі підрозділяють на ковальські горни, очкові, щілинні, камерні, методичні, напівметодичні, карусельні та ін. У ковальських цехах крупносерійного й масового виробництва велике поширення одержали печі, що мають високу продуктивність, такі як методичні, напівметодичні й карусельні. У прохідних печах (методичних і карусельних) завантаження й вивантаження виробів здійснюються безупинно. У цехах з індивідуальним і дрібносерійним виробництвом використовують камерні й щілинні печі; у невеликих кузнях – ковальські

горни й очкові печі. У камерних печах завантаження виробів періодичне. Їх можна підрозділити на два види. У печах з постійною температурою робочого простору завантаження й вивантаження заготовок здійснюють через те саме вікно, вироби в процесі нагрівання залишаються нерухомими. У камерні печі зі змінною температурою робочого простору завантажують партію (садку) виробів. Заготовки з таких печей зазвичай видають поштучно. Для нагрівання кольорових металів і сплавів у ковальських цехах використовують електричні печі, що дозволяють проводити процес нагрівання в захисних атмосферах.

За видом енергоносія печі підрозділяють на полум'яні й електричні, а перші, у свою чергу, поділяють на газові й мазутні. Іноді полум'яні печі класифікують за способом утилізації теплоти газів, що відходять: рекуперативні й регенеративні.

Є безліч інших ознак класифікації печей, однак вони мають другорядне значення.

Більш загальною ознакою класифікації служить температурний режим печі, відповідно до якого всі нагрівальні печі підрозділяють на три класи: з постійною температурою робочого простору, зі змінною температурою робочого простору й прохідні печі. Для першого класу печей характерний одноступінчастий режим нагрівання, для другого – багатоступінчастий. У прохідних печах можуть бути реалізовані як одноступінчасті, так і багатоступінчасті режими нагрівання.

1.8.2. Камерні печі з постійною температурою робочого простору

Для нагрівання заготовок під висадження й штампування масою до декількох кілограмів часто використовують очкові печі, які можуть бути поворотними або нерухомими. У стінках печі є отвори – окуляри, у які вставляють заготовки, що нагріваються. Опалюють печі газом або мазутом. Пальниковий камінь розташовують у поді. Продукти згоряння нагрівають заготовки, а потім видаляються в трубчастий рекуператор, у який повітропроводом подається холодне повітря. Повітропроводом нагріте повітря подається до паливоспалювального пристрою. Очищення поду від окалини проводять через отвори, що закриваються цеглою.

Печі мають потужність 100–150 кВт, високу продуктивність і низький ККД, що не перевищують 15 % внаслідок малої ефективності

рекуператора. Гази виходять із окулярів і змішуються з навколишнім повітрям. Потім суміш видаляється через рекуператор під настил печі.

Камерні печі широко використовують у кузнях багатонаменклатурного основного виробництва, а також у ремонтних майстернях.

Робочий простір печі має розміри: довжину А, ширину Б і висоту В.

Газ або мазут подаються в піч через паликовий камінь. Продукти згоряння каналами надходять у рекуператор. Робоче вікно печі закривається заслінкою.

Завантаження й вивантаження дрібних виробів здійснюють вручну. Якщо маса заготовки перевищує 10 кг, печі облаштовують засобами зовнішньої механізації. При відведенні продуктів згоряння вниз, у лежак, піч встановлюють на фундамент, а якщо вони видаляються під настил, то печі фундаменту не мають і встановлюються на ніжках, як наведено на рис. 1.

Розроблені конструкції дво- і трикамерних печей. Використання цих печей вигідніше внаслідок економії місця й теплоти.

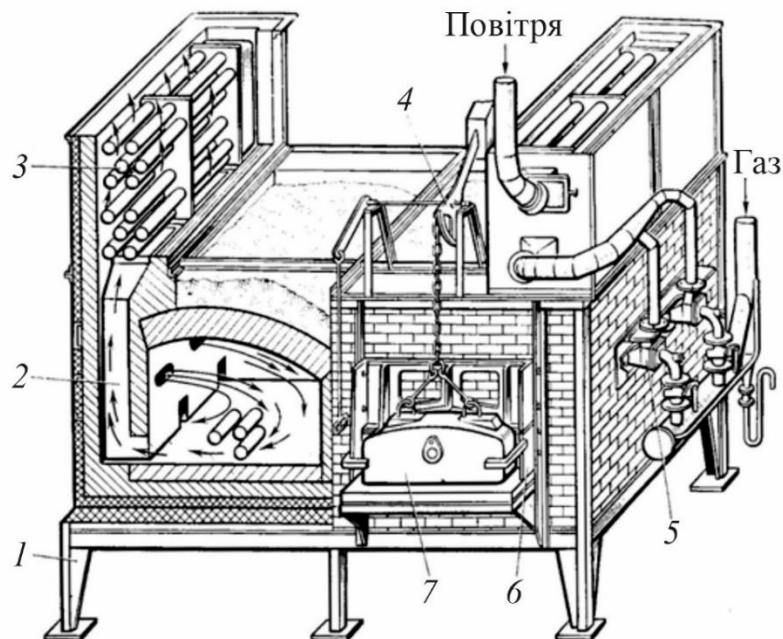


Рисунок 1 – Двокамерна ковальська піч

У двокамерній печі горілка 5 і канали для відведення продуктів згоряння 2 розташовані на одній стінці, що створює підковоподібний рух газів, які надходять у рекуператор 3. Вікна закриті заслінками 7, які сковзають уздовж рам 6. Переміщення заслінки здійснюється секторним механізмом 4.

Продуктивність печі при нагріванні сталі під обробку тиском дохо-

дять до 200 (легована сталь) і 400 кг/(м²·год) (вуглецева й низьколегована сталі). Число горілок або форсунок залежить від довжини поду. Поверхня нагрівання рекуператора дорівнює 5 м²/м² площі поду. Витрата палива залежить від площі поду й визначається такими величинами:

Площа поду, м ²	Менше 2	2–3	3–5	5–7,5
Витрата природного газу, м ³ /(м ² ·год)	50	45	40	35
Витрата мазуту, кг/(м ² ·год)	40	35	30	27–28

Камерні щілинні печі використовують для нагрівання кінців заготовок під кування, штампування або осадження. Печі цього типу встановлюють на підлогу цеху на ніжках. Горілку встановлюють у бічних стінках у шаховому порядку. Продукти згоряння надходять у рекуператор, розміщений над піччю. Для захисту обслуговуючого персоналу від випромінювання вікна забезпечуються пересувними водяними або повітряними завісами.

Продуктивність печей при нагріванні вуглецевих і низьколегованих сталей становить приблизно 400 кг/(м²·год). При нагріванні легованих сталей вона знижується вдвічі. Число форсунок або горілок дорівнює (ширина РП)/4. Площа нагрівання рекуператора становить 5 м²/м² площі поду. Витрата палива становить: мазуту 110–125 кг/т; природного газу 130–150 м³/т. При нагріванні легованих сталей витрата палива збільшується вдвічі.

Для нагрівання кінців штанг перед обробкою на горизонтально-кувальних машинах використовують щілинні механізовані конвеєрні печі. Вони можуть бути горизонтальними або вертикальними. Для горизонтальних печей довжина робочого простору А змінюється від 1044 до 1972 мм, ширина Б – від 580 до 2204 мм і висота В – від 800 до 1800 мм із площею поду – від 0,6 до 4,4 м².

1.9. Основи проектування печей

1.9.1. Вибір типу печі

На машинобудівних заводах використовують різноманітні за конструкцією й розмірами печі. Це викликано більшим різноманіттям форм і розмірів заготовок і деталей, що нагріваються, масштабів виробництва, технологічних режимів гарячої обробки виробів.

При виборі проектованої печі (ковальської для гарячого об'ємного

штампування) доцільно скористатися рекомендаціями А. М. Мансурова і Я. Я. Голомба [5–7], які всі заготовки за характером їх нагрівання підрозділили на п'ять груп:

- 1 – однократно нагрівається один кінець;
- 2 – багаторазово нагрівається один кінець;
- 3 – однократно нагріваються обидва кінця;
- 4 – нагрівається середня частина;
- 5 – заготовка нагрівається цілком.

Заготовки першої групи підрозділяють на дві підгрупи:

1. Довжина кінця, що нагрівається, $l_n < 5d$, а довжина всієї заготовки $l_3 = (5-10)d$, де d – діаметр заготовки. Зазвичай в цих заготовках осадженням на горизонтально-кувальних машинах роблять стовщення на одному кінці. При дрібносерійному виробництві подібні заготовки доцільно нагрівати в газових очкових печах, а при масовому – в індукційних нагрівачах або печах швидкісного нагрівання;

2. $l_n < 10d$, $l_3 > 10d$ (досягає – 8 м). На кінцях заготовок осадженням виконують стовщення. Нагрівання заготовок слід проводити в печах щілинного типу.

Заготовки другої групи використовують для виготовлення кільцеподібних поковок із прутка, що має довжину кілька метрів. Прутки доцільно нагрівати в печах щілинного типу.

Заготовки третьої групи залежно від довжини кінців, що нагріваються, підрозділяють на дві підгрупи: $l_n < 0,5l_3$ і $l_n > 0,5l_3$. Перші зазвичай нагрівають у печах щілинного типу або в індукторах, а другі – тільки в щілинних.

Заготовки четвертої групи використовують для виготовлення деталей згинанням. Їх підрозділяють, як і в третій групі, на дві підгрупи. Заготовки першої підгрупи можна нагрівати в газових щілинних печах, а заготовки другої підгрупи також і на електроконтактних установках.

Заготовки п'ятої групи підрозділяють на три підгрупи: постійного перерізу мірної довжини, постійного перерізу немірної довжини й періодичного перерізу мірної довжини. Заготовки першої підгрупи нагрівають у полум'яних печах або в індукторах. Якщо довжина заготовок $l_3 = (3-12)d$, то їх нагрівають у печах з обертовим подом, а якщо довжина більше – у штовхальних.

Прутки діаметром 20–120 мм, що належать до другої підгрупи,

нагрівають в індукторах. Періодичний прокат (третя підгрупа) нагрівають у штовхальних печах.

Нагрівання заготовок з кольорових металів і сплавів перед об'ємним штампуванням доцільно здійснювати в електричних печах різних конструкцій і в індукторах. Питома продуктивність g таких печей залежно від виду сплаву має значення:

Сплав	Алюмінієвий	Магнієвий	Мідний	Титановий
$g, \text{кг/м}^2$	95–145	50–85	220–290	150–200

Термообробку поковок і штампувань проводять зазвичай в конвексних печах. Якщо температура нагрівання перевищує 900°C , то краще використовувати більш надійні штовхальні печі.

Нагрівання заготовок і злитків для вільного кування проводять найчастіше в полум'яних камерних печах різних конструкцій як з нерухомим, так і з висувним подом. У цих же печах здійснюють і термообробку поковок. Довгі поковки відповідального призначення, наприклад вали, нагрівають при термообробці у вертикальних печах.

При виборі способу нагрівання виробів або заготовок доводиться звертати особливу увагу на використання способів зменшення окиснення й знеуглецьовування сталі.

1.9.2. Порядок проектування печей

Проект будь-якої печі розробляється на основі завдання, що включає технологічне призначення печі, найменування металу або сплаву, форму, розмір і масу заготовок, початкову й кінцеву температуру нагрівання, продуктивність печі або масу садки, вид енергоносія, теплотехнічні показники витрати палива, перепад температур по перерізу заготовок, апаратуру для контролю теплового режиму печі, спосіб механізації обслуговування печі, заходи щодо техніки безпеки.

При виконанні проекту рекомендується максимально використовувати довідкові дані й нормалі проектних організацій на печі, деталі й вузли печей.

Розрахункова частина записки включає розрахунки горіння палива з визначенням кількості й складу продуктів згорання. За довідковими або дослідними даними орієнтовно вибирають площу поду печі й висоту робочого простору, тобто внутрішні розміри пічного простору. За цими

розмірами, складом й температурою пічних газів розраховують значення коефіцієнтів променистої й конвективної тепловіддачі від теплоносія до поверхні виробів, що нагріваються.

Другим етапом будуть розрахунки нагрівання металу. Для цього необхідно знати спосіб розміщення виробів на поді печі, температуру теплоносія, вибрати з довідкових даних теплофізичні властивості металу. Після визначення числа Біо слід вибрати необхідну методику розрахунків, що дозволяє обчислити тривалість нагрівання й перепад температур по перерізу виробу.

Розрахунок нагрівання металу дозволяє уточнити розміри поду печі з урахуванням заданих продуктивності й перепаду температур по перерізу виробу.

Третім етапом проектування є креслення ескізу печі із зазначенням товщини пічних огорожень, товщин їх окремих шарів і обраних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів. На ескізі вказується розміщення паливоспалювальних пристроїв, робочих вікон, заслінок і їх ізоляції, каналів для відведення продуктів згоряння.

Наявність ескізу печі дозволяє провести розрахунки теплового балансу, про що сказано нижче. Цей розрахунок дає можливість визначити витрату палива на піч, обчислити обсяг продуктів згоряння й коефіцієнт корисної дії печі.

За обчисленою сумарною витратою палива вибирають тип горілок. Їхнє число вказують на ескізі. Запас горілок за продуктивністю повинен становити 20–30 %. Для електричних печей розраховують і вибирають нагрівачі.

За виходом продуктів згоряння й температури газів, що йдуть із печі, проводиться розрахунок теплообмінного апарата з визначенням поверхні нагрівання й аеродинамічного опору, як повітряного, так і димового трактів.

Розрахункова частина закінчується визначенням втрат тиску за повітряним і димовим трактами, вибором вентилятора й обчисленням висоти димової труби.

Проект складається з розрахунково-пояснювальної записки й необхідного числа креслень. Проекти підрозділяють на технічні й робочі. Графічна частина технічного проекту включає креслення загального виду печі з необхідними розрізами, теплообмінним апаратом, механізмами для транспортування виробів у печі, каркасом, рамами, заслінками й

механізмами для переміщення заслінок і т.д. Робочий проект включає робочі креслення всіх вузлів і деталей.

1.9.3. Визначення основних розмірів печі

Розміри робочого простору печі повинні задовольняти дві основні вимоги. Довжина L і ширина B поду мають забезпечувати задану продуктивність печі за нагрітим металом G . Висота робочого простору H повинна бути такою, щоб забезпечити повне згоряння палива й теплообмін між газами й виробами або заготовками, що нагріваються. Її слід вибирати також з урахуванням розміщення садки в робочому просторі.

Розміри поду залежать головним чином від тривалості нагрівання τ , яку можна визначити за залежностями, наведеними у підрозділі 2.5. Визначення розмірів робочого простору печі.

1.9.4. Ескіз печі

На ескізі печі вказують розміри робочого простору печі й зовнішні габаритні розміри, тобто наносять розміри кладки поду, стін і зводу. Товщину пічних стінок встановлюють із урахуванням будівельної міцності й температури в робочому просторі печі. Стосовно будівельної міцності необхідно брати до уваги висоту вертикальних стін і ширину прогону, що перекривається арковим зводом, а також його кривизну, що характеризується центральним кутом α .

Залежно від температури внутрішньої поверхні кладки стінки нагрівальних печей можуть бути викладені з різних матеріалів. При температурі газів у печі до 1000 °С звід можна викладати із шамоту класів Б і В, а при більш високих температурах – із цегли класу А, або динасового. У якості ізоляції стін і зводів можна використовувати діатомітові вироби й засипку.

У печах періодичної дії внутрішній шар кладки стін доцільно виконувати з легковагих вогнетривких матеріалів, незважаючи на їхню підвищену вартість. Це дозволить знизити витрати палива на розігрівання печі до робочого стану й скоротити тривалість розігрівання.

Правильність вибору товщини стінки контролюють за температурою зовнішньої поверхні стінки. Вона не повинна перевищувати 60 °С. Цій температурі відповідає щільність теплового потоку в зовнішнє середовище q , дорівнює 500 Вт/м².

На ескізі вказуються місця розміщення горілок, каналів для

відведення продуктів горіння, робочих і кантувальних вікон.

Рівномірне нагрівання виробів забезпечується розосередженим підведенням палива в піч декількома горілками або форсунками. Перші з них повинні мати продуктивність за природним газом 10–50 м³/год, а другі – 15–50 кг/год. Зазвичай осі горілок або форсунок у камерних і прохідних печах, крім методичних, стоять одне від одного на відстані 400–700 мм. Часто між горілками розміщують канали для відведення продуктів горіння. У печах з нижніми топками відстань між осями горілок становить зазвичай 810 мм.

При складанні ескізу печей з викатними подами слід передбачити інтенсивну циркуляцію газів у робочому просторі, що забезпечує омивання газами всіх виробів.

1.10. Визначення витрати палива. Тепловий баланс печі

Витрату палива найбільш точно можна визначити на підставі розрахунків теплового балансу, що полягає із двох кількісно однакових частин: прибуткової $Q_{\text{приб}}$ і видаткової $Q_{\text{вид}}$. Відповідно до закону збереження енергії $Q_{\text{приб}} = Q_{\text{вид}}$. У прибуткову частину входять статті підведення теплоти з паливом, підігрітим повітрям і екзотермічними реакціями, а у видаткову – витрати її на нагрівання оброблюваного матеріалу й на втрати в навколишнє середовище.

Перед розрахунками теплового балансу необхідно мати ескіз печі, що розраховується, з розмірами кладки, вікон і каналів для видалення продуктів згоряння.

Для печей безперервної дії баланс складається на 1 с або 1 год роботи печі, а для печей періодичної дії – на цикл роботи (операцію – відпал і т.д.).

Залежності, необхідні для розрахунків теплового балансу печі, розглянуті в підрозділі 2.5. Тепловий баланс. Визначення витрати палива.

Контрольні запитання і завдання

1. Найважливіші характеристики нагрівання сталі.
2. Паливо та його характеристики.
3. Теплота згоряння палива. Методи визначення.
4. Мазут та його властивості.
5. Газоподібне паливо та його властивості.

6. Призначення та вимоги до горілок і форсунок.
7. Особливості режимів нагрівання виробів.
8. Розв'язок рівняння теплопровідності.
9. Класифікація вогнетривких матеріалів.
10. Технологія виготовлення вогнетривких виробів.
11. Будівельні матеріали для промислових печей.
12. Метали й сталі для будування печей.
13. Особливості використання футеровки печей.
14. Особливості фундаментів печей.
15. Назвіть та опишіть елементи нагрівальних печей.
16. Призначення теплообмінних апаратів.
17. Вимоги, які ставляться до печей.
18. Призначення камерних печей.
19. Класифікація печей.
20. Рекомендації для вибору проектованої печі.
21. Порядок проектування печей.
22. Визначення основних розмірів печі.
23. Вкажіть елементи, що виносяться на ескіз печі.
24. Визначення витрати палива.

2. ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Студенти одержують індивідуальне завдання відповідно до порядкового номера в журналі академічної групи. Вихідні дані для виконання розрахункового завдання наведено в додатку 3.

Виконане завдання повинно містити такі розділи (Додаток 4):

1. Розрахунки горіння палива.
2. Розрахунки часу нагрівання заданої заготовки для кування (штампування) у камерній печі.
3. Визначення розмірів робочого простору печі. Ескіз поду печі (з розташованими на ньому заготовками).
4. Вибір кладки. Компонування печі. Ескіз печі.
5. Тепловий баланс. Визначення витрати палива.
6. Основні техніко-економічні показники роботи печі.

2.1. Розрахунки горіння палива

2.1.1. Розрахунок горіння газоподібного палива

Склад палива відповідно до завдання знаходиться за формулою



Визначення кількості повітря, необхідного для повного згорання палива.

1) Кількість кисню, необхідна для горіння:

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \left[0,5(\text{H}_2 + \text{CO} + 3\text{H}_2\text{S}) + (m + n / 4) \sum \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right].$$

2) Кількість теоретично необхідного повітря:

$$L_0 = (1 + k)V_{\text{O}_2},$$

де k – відношення об'ємного вмісту азоту до кисню у звичайному повітрі, не збагаченому киснем, $k = 3,76$.

3) Дійсна кількість повітря, необхідного для горіння:

$$L\alpha = \alpha L_0,$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, заданий в умові завдання, що передбачає неякісне сумішоутворення.

Визначення кількості і складу продуктів горіння (ПГ). Продукти горіння містять наступні елементи й з'єднання: RO_2 ($RO_2 = CO_2 + SO_2$), H_2O , N_2 і O_2 .

1) Об'єм RO_2 ($RO_2 = CO_2 + SO_2$), m^3/m^3 :

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + m \sum C_m H_n + SO_2 + H_2S).$$

2) Водяна пара утворюється при горінні вуглеводнів, водню й сірководню. Тоді кількість водяної пари в продуктах повного горіння, m^3/m^3 :

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + H_2S + 0,5n \sum C_m H_n).$$

3) Об'єм азоту, m^3/m^3 :

$$V_{N_2} = 0,01N_2 + kV_{O_2}.$$

4) Об'єм надлишкового кисню, m^3/m^3 :

$$V_{O_2}^{над} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2}.$$

5) Об'єм надлишкового азоту, m^3/m^3 :

$$V_{N_2}^{над} = k \cdot V_{O_2}^{над}.$$

6) Сумарний об'єм азоту, m^3/m^3 :

$$V_{N_2}^{сум} = V_{N_2} + V_{N_2}^{над}.$$

7) Теоретична кількість продуктів згоряння (дим):

$$V_0 = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}.$$

8) Загальна кількість продуктів згоряння (дим):

$$V_a = V_0 + V_{O_2}^{над} + V_{N_2}^{над}.$$

9) Склад продуктів згоряння (дим), %:

$$CO_2 = \frac{V_{RO_2} \cdot 100}{V_a};$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_a};$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}^{сум} \cdot 100}{V_\alpha};$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}^{над} \cdot 100}{V_\alpha}.$$

10) Щільність продуктів згоряння, кг/м³:

$$\rho_0 = 0,01(44CO_2 + 28N_2 + 18H_2O + 32O_2)/22,4.$$

Визначення температури горіння палива за формулою Менделєєва.

1) Тепло згоряння газу, кДж/м³:

$$Q_n^p = 127CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_mH_n + 560C_2H_2 + 636C_2H_6 + \\ + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + 234H_2S.$$

2) Хімічна ентальпія продуктів згоряння, кДж/м³:

$$i_x = Q_n^p / V_\alpha.$$

3) Ентальпія повітря, кДж/м³ (у випадку його підігріву):

$$i_n = C_n \cdot t_n \cdot \frac{L_\alpha}{V_\alpha},$$

де C – теплоємність повітря при заданій температурі t_n можна знайти у таблиці, наведеній нижче, t_n – температура повітря, задана в умові завдання:

$t, ^\circ C$	0	100	200	300	400
$C, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ C)$	1,298	1,302	1,309	1,318	1,330

4) Ентальпія продуктів згоряння, кДж/м³:

$$i = i_x + i_B.$$

5) Теоретична температура згоряння, °C:

Після визначення ентальпії продуктів згоряння i методом інтерполяції на інтервалі, за таблицею знаходиться теоретична температура згоряння:

$i, \text{кДж}/\text{м}^3$	2405	2585	2785	2955	3170	3385	3625	3890	4190	4520	5015
$t, ^\circ C$	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500

Принцип методу інтерполяції розглянемо на прикладі:

Припустимо, ми одержали $i = 3055 \text{ кДж/м}^3$.

1. За таблицею вибираємо інтервал, на якому є присутнім $i = 3055 \text{ кДж/м}^3$, це інтервал між 2955 кДж/м^3 і 3170 кДж/м^3 .

2. Потім визначаємо, скільки $^{\circ}\text{C}$ припадає на 1 кДж/м^3 на цьому інтервалі, робимо це в такий спосіб: $(1900-1800)/(3170-2955) = 0,4651 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Визначаємо, скільки $^{\circ}\text{C}$ припадає на ділянку від 2955 до 3055 кДж/м^3 :

$$t_{\text{int}} = (3055-2955)*0,4651 = 100*0,4651 = 46,51 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

4. Знаходимо температуру, відповідну $i = 3055 \text{ кДж/м}^3$. При $i = 2955 \text{ кДж/м}^3$ температура $t = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а на інтервалі від 2955 до 3055 кДж/м^3 дорівнює $\Delta t = 46,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Тоді наша шукана температура $t = 1800 + 46,51 = 1846,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

б) Дійсна температура згоряння, $^{\circ}\text{C}$.

Дійсна температура горіння t_n , спостережувана в печі, завжди нижча теоретичної, тому що процес горіння супроводжується втратою теплоти піччю в навколишнє середовище: чим більше втрачається теплоти, тим нижча практична температура згоряння:

$$t_n = \eta t,$$

де η – пірометричний коефіцієнт; для нагрівальних печей він дорівнює $0,65-0,75$.

Менші значення η приймають для камерних печей, більші – для методичних, карусельних і т.п. печей. У нашому випадку використовується камерна піч, η приймаємо рівним $0,65$. Якщо ж температура горіння недостатня, то коефіцієнт η необхідно підвищити, привівши відповідне мотивування, або підвищити температуру підігріву повітря.

2.1.2. Розрахунок горіння рідкого палива

Визначення складу робочої маси палива. Слід відразу зазначити, що вміст азоту й кисню заданий у вигляді $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^{\Gamma}$, тому для подальших розрахунків необхідно розділити азот і кисень 50:50. Наприклад, вам заданий $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^{\Gamma} = 0,9 \%$, тоді після поділу ми одержимо $\text{O}_2^{\Gamma} = 0,45 \%$ і $\text{N}_2^{\Gamma} = 0,45 \%$.

В умовах завдань склад палива задано у вигляді горючої маси палива (C^{Γ} , H^{Γ} , S^{Γ} , O_2^{Γ} , N_2^{Γ}), тому необхідно перерахування складу палива на робочу масу, формула для перерахування має такий вигляд:

$$X^P = X^{\Gamma}(100 - W^P - A^P)/100.$$

Склад робочої маси заданого палива знаходиться за формулою

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100 \text{ \%}.$$

Визначення кількості повітря, необхідного для повного згорання палива.

1) Кількість кисню, необхідна для згорання:

$$V_{O_2} = 0,01(1,867C^P + 5,6H^P + 0,7S^P - 0,7O^P).$$

2) Кількість теоретично необхідного повітря:

$$L_0 = (1 + k)V_{O_2},$$

де k – відношення об'ємного вмісту азоту до кисню у звичайному повітрі, не збагаченого киснем, $k = 3,76$.

3) Дійсна кількість повітря необхідного для горіння:

$$L\alpha = \alpha L_0,$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, заданий в умові завдання.

Кількість і склад продуктів горіння (ПГ).

1) Об'єм CO_2 , m^3/kg :

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867 \cdot C^P.$$

2) Сумарна кількість водяної пари в продуктах горіння, m^3/kg :

$$V_{H_2O} = 0,01[11,2H^P + 1,24W^P],$$

де W^P – водяна пара, внесена в паливо при розігріванні. У нашому випадку вважаємо, що паливо не вимагає розігрівання, установимо $W^P = 0$.

3) Об'єм SO_2 , m^3/kg :

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^P.$$

4) Об'єм надлишкового кисню, m^3/kg :

$$V_{O_2}^{над} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2}.$$

5) Об'єм азоту, м³/кг:

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 0,8N^P + kV_{O_2}.$$

6) Об'єм надлишкового азоту, м³/м³:

$$V_{N_2}^{\text{над}} = k \cdot V_{O_2}^{\text{над}}.$$

7) Сумарний об'єм азоту, м³/м³:

$$V_{N_2}^{\text{сум}} = V_{N_2} + V_{N_2}^{\text{над}}.$$

8) Теоретична кількість продуктів згоряння (дим):

$$V_0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2}.$$

9) Сумарний об'єм продуктів згоряння, м³/кг:

$$V_a = V_0 + V_{O_2}^{\text{над}} + V_{N_2}^{\text{над}}.$$

10) Склад вологих продуктів згоряння), %:

$$CO_2^B = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{V_a};$$

$$H_2O^B = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_a};$$

$$N_2^B = \frac{V_{N_2}^{\text{сум}} \cdot 100}{V_a};$$

$$O_2^B = \frac{V_{O_2}^{\text{над}} \cdot 100}{V_a};$$

$$SO_2^B = \frac{V_{SO_2} \cdot 100}{V_a}.$$

11) Склад сухих продуктів згоряння, %:

$$CO_2^C = \frac{V_{CO_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B};$$

$$N_2^C = \frac{V_{N_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B};$$

$$O_2^C = \frac{V_{O_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B};$$

$$SO_2^C = \frac{V_{SO_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B}.$$

Результати розрахунків вологих і сухих продуктів згорання записуються в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків продуктів згорання

	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	O ₂	N ₂	Сума, %
Вологі						
Сухі		–				

12) Щільність продуктів згорання, кг/м³:

$$\rho_0 = 0,01(44CO_2^B + 28N_2^B + 18H_2O^B + 32O_2^B + 64SO_2^B)/22,4,$$

де CO₂^B, N₂^B, H₂O^B, O₂^B, SO₂^B – процентний вміст з'єднань у вологих ПГ.

Визначення температури горіння палива.

1) Тепло згорання мазуту, кДж/м³:

$$Q_H^P = 340C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P.$$

2) Хімічна ентальпія продуктів згорання, кДж/м³:

$$i_x = Q_H^P / V_\alpha.$$

3) Ентальпія повітря, кДж/м³:

$$i_B = C_B \cdot t_B \cdot \frac{L_\alpha}{V_\alpha},$$

де C – теплоємність повітря при заданій температурі t_B можна знайти нижче, t_B – температура повітря, задана в умові завдання.

$t, ^\circ\text{C}$	0	100	200	300	400
$C, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	1,298	1,302	1,309	1,318	1,330

4) Ентальпія продуктів згоряння, кДж/м³:

$$i = i_x + i_b.$$

5) Теоретична температура згоряння, °С.

Після визначення ентальпії продуктів згоряння i методом інтерполяції на інтервалі знаходиться теоретична температура згоряння:

i , кДж/м ³	2405	2585	2785	2955	3170	3385	3625	3890	4190	4520	5015
t , °С	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500

6) Дійсна температура згоряння, °С.

Дійсна температура згоряння t_n , спостережувана в печі, завжди нижче теоретичної, тому що процес горіння супроводжується втратою теплоти піччю в навколишнє середовище: чим більше губиться теплоти, тим нижче практична температура згоряння:

$$t_n = \eta t,$$

де η – пірометричний коефіцієнт; для нагрівальних печей він дорівнює 0,65–0,75.

Менші значення η приймають для камерних печей, більші – для методичних, карусельних і т.п. печей. У нашому випадку використовується камерна піч, η приймаємо рівним 0,65. Якщо ж температура згоряння недостатня, то коефіцієнт η необхідно підвищити, привівши відповідне мотивування, або підвищити температуру підігріву повітря.

Контрольні запитання

1. Розрахунок газоподібного палива при горінні.
2. Визначення кількості і складу продуктів горіння для газоподібного палива.
3. Формула Менделєєва.
4. Визначення складу робочої маси палива.
5. Розрахунок рідкого палива при горінні.
6. Визначення кількості повітря для повного згоряння палива.
7. Визначення температури горіння рідкого палива.
8. Визначення кількості і складу продуктів горіння для рідкого палива.

2.2. Розрахунки часу нагрівання заготовки у камерній печі

Задача нагрівання заготовок полягає в тому, щоб за мінімально допустимий час нагрівати їх до заданої температури.

При цьому необхідно враховувати, що скорочення часу нагрівання (збільшення швидкості нагрівання) має свої переваги (зниження витрати палива, підвищення продуктивності праці, зменшення зневуглицювання, зменшення окалиноутворення) і недоліки (небезпека виникнення появи термічних напружень значної величини (тріщини), небезпека виникнення браку у вигляді перегрівання; можливість виникнення перепалення).

2.2.1. Вибір температурного режиму кування

У таблиці 2 наведені деякі марки сталей і відповідні температури початку й кінця кування ($t_{п.к}$, $t_{к.к}$) [3].

Таблиця 2 – Температури початку й кінця нагрівання

Марка сталі	$t_{п.к}$, °С	$t_{к.к}$, °С	Марка сталі	$t_{п.к}$, °С	$t_{к.к}$, °С
Сталь 08кп	1250	800	Сталь 30Х	1250	800
Сталь 08	1250	800	Сталь 40ХН	1250	830
Сталь 20	1280	750	Сталь 15ХМ	1260	750
Сталь 15	1300	700	Сталь 40Х	1250	800
Сталь В8	1180	800	Сталь 30Х13	1250	850
Сталь В12	1160	800	Сталь 20Х13	1250	850
Сталь 20ХН3	1250	860	Сталь 10кп	1300	700
Сталь 20ХМ	1220	800	Сталь 35	1280	750
Сталь Х6М	1170	850	Сталь 3Х13	1230	850
Сталь 30	1280	750	Сталь 30ХН3	1220	800
Сталь 30ХГС	1240	800	Сталь 15кп	1300	700

Температура робочого простору печі визначається за формулою, °С,

$$t_{п} = t_{п.к} + (50...100).$$

Примітка: якщо є можливість, то до $t_{п.к}$ додайте таке число із проміжку 50...100 °С, щоб вийшло 1200, 1300 або 1400 °С, надалі це може полегшити розрахунки.

Температура кінця нагрівання визначається за формулою, °С,

$$t_{к.н} = t_{п.к} + (0...50).$$

Примітка: якщо є можливість, то до $t_{п.к}$ додайте таке число із проміжку 0...50 °С, щоб вийшло 1100, 1150, 1200 або 1250 °С, надалі це може полегшити розрахунки.

Температура початку нагрівання $t_{п.н}$. Через те що ми будемо використовувати заготовки, взяті зі складу при кімнатній температурі, то приймаємо $t_{п.н} = 20$ °С.

2.2.2. Критерій Біо

Для визначення межі між термічно тонкими та товстими заготовками використовують критерій Біо. З теплофізичної точки зору – це відношення внутрішнього теплового опору металу до теплового опору тепловіддачі:

$$Bi = \frac{\alpha_{п+к} \cdot S}{\lambda},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, матеріалу заготовки при температурі заготовки $t = 500$ °С; S – товщина нагрівання заготовки, м, у випадку циліндричної заготовки $S = R$, при двосторонньому нагріванні; $\alpha_{п+к}$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі, що враховує променистий і конвективний теплообмін, $\frac{Вт}{м \cdot К}$, при $t_m = 500$ °С, тому що до цієї температури найбільша ймовірність появи термічних тріщин,

$$\alpha_{п+к} = \frac{C_{г.к.м} \cdot \left[\left(\frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{м}}{100} \right)^4 \right]}{t_{г} - t_{м}} + 12,$$

де $C_{г.к.м}$ – наведений коефіцієнт випромінювання між продуктами горіння: внутрішньою поверхнею стіни і поверхнею металу, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; $C_{г.к.м} = 3,5 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – для газоподібного палива (приблизно); $C_{г.к.м} = 3 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – для рідкого палива (приблизно); $t_{г} = t_{п}$ – температура газів печі, °С; $t_{м} = 500$ °С – температура металу; $T_{г}$, $T_{м}$ – температури в кельвінах (°С + 273).

У таблиці 3 наведені теплопровідності λ деяких сталей при 500 °С [4].

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта теплопровідності λ

Марка сталі	λ , Вт/(м ² К)	Марка сталі	λ , Вт/(м ² К)
Сталь 08кп	41,1	Сталь 30Х	36,5
Сталь 08	40,2	Сталь 40ХН	37,3
Сталь 20	39,3	Сталь 15ХМ	36,1
Сталь 15	43,2	Сталь 40Х	33,2
Сталь В8	35,2	Сталь 30Х13	27,2

Закінчення таблиці 3

Марка сталі	λ , Вт/(м ² К)	Марка сталі	λ , Вт/(м ² К)
Сталь В12	34,7	Сталь 20Х13	27,2
Сталь 20ХН3	36,5	Сталь 10кп	40,1
Сталь 20ХМ	36,1	Сталь 35	41,2
Сталь Х6М	33,5	Сталь 3Х13	27,2
Сталь 30	39,3	Сталь 30ХН3	33,5
Сталь 30ХГС	36,1	Сталь 15кп	43,2

2.2.3. Визначення часу нагрівання

Часом нагрівання розуміють як закон зміни температури печі та температури металу у функції часу в процесі нагрівання, і який вказує на швидкість нагрівання виробів до заданої температури, тривалість та температуру на окремих ділянках і загальну тривалість нагрівання.

Аналітичний розрахунок часу нагрівання заготовок [1].

1) Час нагрівання:

$$\tau_n' = \frac{S \cdot \rho \cdot C}{k_1 \cdot \alpha_{п+к}} \cdot \ln \left(\frac{t_{г} - t_{м}^{пoch}}{t_{г} - t_{м}^{кин}} \right) \cdot m,$$

де k_1 – коефіцієнт форми. Для пластини $k_1 = 1$, а для циліндра – $k_1 = 2$. У даному завданні розглядаємо циліндричні заготовки, приймаємо $k_1 = 2$; S – товщина пластини або радіус циліндра, м; C – середня питома теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ (див. додаток 2); ρ – питома вага при середній температурі, $кг/м^3$ (див. додаток 1); $t_{г} = t_{п}$ – температура газів печі; $t_{м}^{кин}$ – кінцева температура заготовки, $t_{м}^{кин} = t_{к.н.}$, °С; $t_{м}^{пoch}$ – початкова температура заготовки, $t_{м}^{пoch} = t_{п.н.}$, °С; m – коефіцієнт врахування виправлення на масивність; $\alpha_{п+к}$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі, що враховує променистий і конвективний теплообмін для розрахунків часу нагрівання, визначаємо для середньої температури металу за час нагрівання, $\frac{Вт}{м \cdot К}$; $t_{м} = 0,67t_{к.н.}$, °С – середня температура металу.

Коефіцієнт, що враховує виправлення на масивність:

$$m = 1 + [(k_3 - 1)/(k_2 \cdot k_3)]Bi,$$

де k_2, k_3 – коефіцієнти, залежні від форми тіла й числа Біо, визначаємо за таблицею 4

Таблиця 4 – Коефіцієнти, залежні від форми тіла й числа Біо

Ві	0	0,5	1,0	5,0	10,0	100
Пластина:						
k_2	2	1,93	1,86	1,73	1,65	1,58
k_3	3	2,96	2,93	2,83	2,80	2,76
Циліндр:						
k_2	2	1,89	1,80	1,45	1,39	1,26
k_3	2	1,96	1,94	1,84	1,80	1,76

Якщо співвідношення довжини заготовки l до її діаметра d , $l/d \leq 3$, то тепло буде надходити в тіло також і з торців. З метою обліку торцевих потоків тепла тривалість нагрівання тіла потрібно помножити на коефіцієнт k_l , який має такі значення:

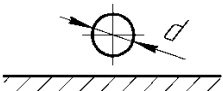

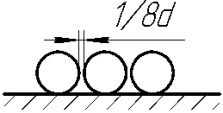
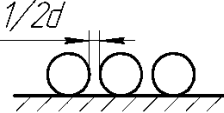
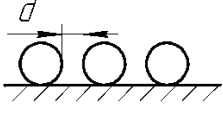
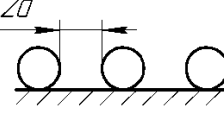
l/d	3	2,5	2	1,75	1,5	1,25	1,0	0,7	0,5
k_l	1	0,96	0,91	0,87	0,83	0,77	0,7	0,6	0,5

Для початкового розрахунку заготовки в печі розташовуються на відстані, рівному діаметру d , одне відносно одного, і тоді необхідно ввести поправковий коефіцієнт $k = 1,2$:

$$\tau_n = \tau_n' \cdot k \cdot k_l = \tau_n' \cdot 1,2 \cdot k_l.$$

При необхідності зміни відстані між заготовками скористайтеся значеннями коефіцієнта k у таблиці 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнт k , залежний від розташування заготовок

Розташування заготовок	Коефіцієнт k	Розташування заготовок	Коефіцієнт k
	1		2
	1,65		1,32
	1,2		1,1

Визначення часу нагрівання заготовок у печі за довідковими даними. Нижче наведена таблиця тривалості нагрівання, хв, кованих і катаних заготовок з вуглецевої і конструкційної сталей при одиночному розташуванні в печі. Визначити по ній час нагрівання заготовки. Зверніть увагу на примітки до таблиці 6.

Таблиця 6 – Тривалість нагрівання заготовок у печі

Діаметр або сторона квадрата, мм	Температура робочого простору, °С											
	1200				1300				1400			
	Кінцева температура нагрівання заготовки, °С, не більше											
	1100		1150		1200		1250		1200		1250	
	Профіль заготовки											
	круглий	квадратний	круглий	квадратний	круглий	квадратний	круглий	квадратний	круглий	квадратний	круглий	квадратний
10	2,5	3,0	3,0	3,5	2,0	2,5	2,0	3,0	1,0	1,5	1,0	1,5
20	4,5	5,5	6,0	7,5	3,0	4,5	4,0	5,0	1,5	2,0	1,5	2,0
30	7,0	9,0	8,5	11,0	5,0	6,0	6,0	8,0	2,5	3,0	2,5	3,0
40	10,0	13,0	11,5	14,5	6,5	8,0	8,0	10,5	3,5	4,5	3,5	4,5
50	12,5	16,0	15,0	19,5	8,0	10,5	10,5	13,5	4,5	5,5	4,5	5,5
60	15,0	19,5	18,0	23,0	10,0	13,0	14,5	16,0	5,0	6,5	5,5	7,0
70	17,0	22,5	21,0	27,0	12,0	15,0	16,5	19,0	6,0	7,5	6,5	8,0
80	20,5	26,5	24,5	31,5	14,0	17,5	19,0	22,0	7,0	9,0	7,5	9,5
90	23,5	30,5	27,5	35,5	16,0	20,0	19,0	24,5	8,0	10,5	8,5	11,0
100	26,0	33,5	31,0	40,0	18,0	23,0	21,0	27,5	9,0	11,5	10,5	13,0
110	29,5	38,0	35,0	45,5	20,0	26,0	23,5	30,5	10,5	13,5	11,5	15,0
120	32,5	41,5	38,5	50,0	22,5	29,5	26,0	33,5	12,0	15,0	13,0	17,0
130	36,0	46,5	42,5	55,0	25,0	32,5	29,0	38,0	13,0	16,5	14,0	18,0
140	39,0	50,5	46,0	59,5	27,5	36,0	32,0	41,5	14,0	18,0	15,5	19,5
150	42,5	55,0	50,0	65,0	30,0	32,0	35,0	45,5	15,5	20,0	17,0	22,0
160	46,0	59,9	54,5	71,0	33,0	43,0	38,5	50,5	16,5	21,5	18,0	23,5
170	50,0	64,5	58,5	76,0	36,0	47,0	42,0	54,5	18,0	23,0	19,5	25,0
180	54,0	70,0	63,0	81,5	39,5	51,5	46,0	59,5	19,5	25,0	21,0	27,0
190	58,0	75,0	68,0	88,0	42,5	55,5	49,5	64,0	21,0	27,0	23,0	29,5
200	62,5	81,0	72,5	94,0	46,0	60,0	53,5	69,0	22,5	29,0	24,5	32,0

Примітки:

- 1). Розташування заготовок слід урахувати коефіцієнтом k (див. табл. 5).
- 2) Для інструментальної вуглецевої і середньолегованої сталей тривалість нагрівання збільшується на 25–30 %, тому вводимо поправковий коефіцієнт $k_m = 1,25 \dots 1,3$, для високолегованих сталей – на 30–50 %, вводимо поправковий коефіцієнт $k_m = 1,3 \dots 1,5$.
- 3). Для обліку впливу довжини заготовки тривалість нагрівання множать на коефіцієнт k_d залежно від відношення довжини l заготовки до розміру перерізу d (або a):

$\frac{l}{d} \left(\frac{l}{a} \right)$, не менше	3	2	1,5	1
k_d	1	0,98	0,92	0,71

Тоді остаточний результат часу нагрівання повинен мати вигляд $t_n = t_i \cdot k_m \cdot k_d$.

Виконання розрахунків на персональному комп'ютері, за допомогою програми (Камерне нагрівання). На підставі аналітичного розрахунку, табличних даних і розрахунку на ПК оцінити точність розрахунків і вибрати час нагрівання t_n .

Контрольні запитання

1. Визначення вибору температурного режиму кування.
2. Визначення температури робочого простору печі.
3. Визначення температури початку і кінця нагрівання.
4. Визначення критерію Біо.
5. Аналітичний розрахунок часу нагрівання.
6. Визначення часу нагрівання заготовок у печі.

2.3. Визначення розмірів робочого простору печі

Вагова продуктивність печі визначається за формулою

$$G = N \cdot g ,$$

де g – вага однієї заготовки, що нагрівається $g = V \cdot \rho$ (нагадуємо, що об'єм циліндра $V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h$, де d – діаметр заготовки, м); N – штучна продуктивність печі, знаходиться з умови завдання.

Величина садки визначається за формулою

$$n = N \cdot \tau_n ,$$

де τ_n – розрахунковий час нагрівання, год.

Активна площа поду визначається за формулою

$$F_{\text{акт}} = n \cdot f ,$$

де f – площа проекції заготовок на под печі, $f = d \cdot l$, м².

Коефіцієнт завантаження поду визначається за формулою

$$k_{\text{поду}} = \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{поду}}},$$

для камерних печей приймаємо $k_{\text{пода}} \approx 0,4$.

Площа поду визначається за формулою

$$F_{\text{поду}} = \frac{F_{\text{акт}}}{k_{\text{поду}}}.$$

Вагова продуктивність поду визначається за формулою

$$P = \frac{G}{F_{\text{поду}}},$$

для камерних печей $P=300\dots600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{год}}$.

Остаточне визначення розмірів робочого простору печі визначається відповідно до схеми, поданої на рис. 2.

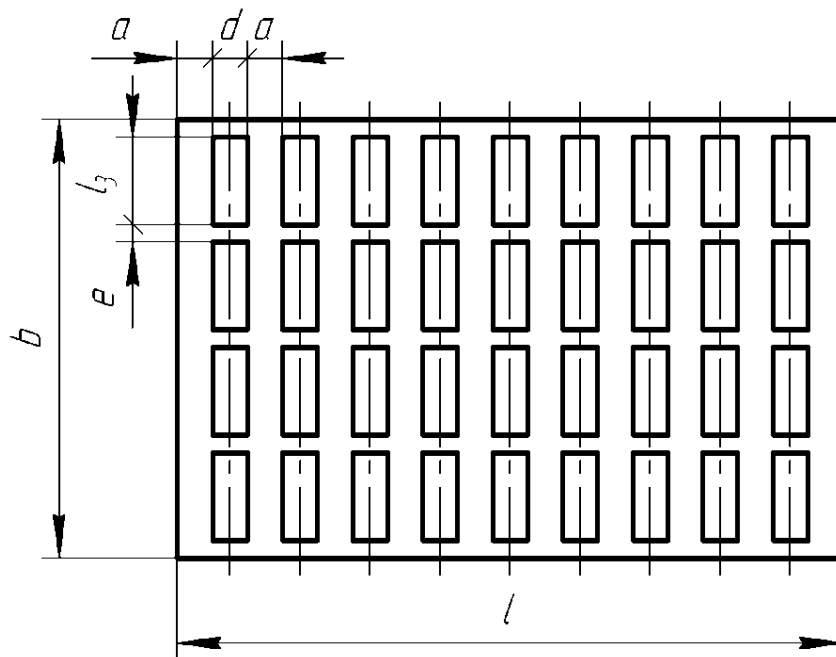


Рисунок 2 – Компонування поду печі

Ширина поду, м

$$B = n_1 \cdot l_3 + (n_1 + 1) \cdot e,$$

де n_1 – число рядів; l_3 – довжина заготовки, м; d_3 – діаметр заготовки або її ширина, м; e – відстань між заготовками за шириною печі, для початкового розрахунку приймаємо $e = d_3/2$. Відстань e може мати такі значення:

Відстань між заготовками, e
0 (впритул)
$1/8d$
$1/2d$
d
$2d$

Довжина поду, м

$$L = n_2 \cdot d_3 + (n_2 + 1) \cdot a,$$

де n_2 – кількість заготовок у ряді; d_3 – діаметр заготовки або її ширина, м; a – відстань між заготовками по довжині печі. Для початкових розрахунків приймаємо $a = d_3$.

Співвідношення ширини до довжини повинно становити приблизно

$$\frac{B}{L} \approx \frac{2}{3}.$$

Висота робочого простору печі

$$H = (0,6..0,8) \cdot B,$$

де B – ширина поду, м;

Остаточна площа поду визначається за формулою

$$F_{\text{остат}} = B \cdot L.$$

При необхідності робимо перерахунок часу нагрівання, змінивши розміщення заготовок (якщо $k_{\text{пода}} < 0,4$). У випадку, якщо вагова продуктивність поду $P > 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{год}}$, то необхідно:

а) збільшити відстань від стін до заготовок і відстань між рядами (відстань e , див. рис. 2);

б) збільшити відстань між деталями й перерахувати час нагрівання (відстань a , див. рис. 2).

Виконання ескізу поду включає розміщення садки на поду печі з розмірами заготовки, зазорів і габаритних розмірів (див. рис. 2).

Контрольні запитання

1. Визначення вагової продуктивності печі.
2. Визначення величини садки.
3. Визначення активної площі і коефіцієнту завантаження поду.
4. Визначення вагової продуктивності поду.
5. Визначення розмірів робочого простору печі.

2.4. Вибір кладки. Компонування печі

2.4.1. Стіни

Стіни нагрівальних печей зазвичай мають внутрішні робочі (вогнетривкі) шари й зовнішні теплоізоляційні. Частіше зустрічаються прямі вертикальні стіни, рідше – похилі й радіальні. Товщина стін і окремих шарів пов'язана з температурним режимом і розмірами самої стіни.

Користуючись таблицею 7, визначаємо матеріал вогнетривкого й теплоізоляційного шару.

Таблиця 7 – Визначення матеріалу вогнетривкого і теплоізоляційного шару

Висота стіни, м	Температура в робочій камері, °С	Робочий вогнетривкий шар		Зовнішній ізоляційний шар	
		матеріал	товщина	матеріал	товщина
До 1	≤ 1200	шамот, клас Б	$\frac{1}{2}$ цегли – 115 мм	діатоміт або піношамот	1 цегла – 230 мм
До 1	> 1200	те ж	1 цегла – 230 мм	те ж	$\frac{1}{2}$ –1 цегла – 115–230 мм
Більше 1	≤ 1200	те ж	1 цегла – 230 мм	те ж	1 цегла – 230 мм
Більше 1	> 1200	шамот, клас А	1-1,5 цегли 230-350 мм	те ж	$\frac{1}{2}$ –1 цегла – 115–230 мм

Для захисту кладки від механічних впливів і усунення фільтрації газів рекомендується застосовувати зовнішній кожух з листової сталі товщиною 4–10 мм.

2.4.2. Звід

Робочий простір печі перекривають зводом. За конструкцією зводи бувають: плоскі, аркові, напівциркуляційні й підвісні.

Аркові зводи прості за конструкцією й надійні в експлуатації, але вимагають обов'язкового застосування каркасу для сприйняття горизонтальної складової опорної реакції, що розпирає стіни.

Радіус зводу приймають рівним ширині прогону B . Тоді стріла підйому зводу $h = (0,12...0,18) B$.

Кладка зводу виконується із прямої й клинової шамотної цегли.

Товщина зводу залежить від ширини прогону B . Приймаємо $B_{\text{звід}} \approx B_{\text{стін}}$. Для зменшення втрат тепла зверху на звід насипають інфузорну землю, обшивають листом заліза, покривають ущільнювальною обмазкою.

2.4.3. Под

На поду розташовують нагрітий метал. Под – відповідальна частина печі, тому що він випробовує навантаження від металу, що нагрівається, зазнає хімічного впливу окалини й стирання заготовками, що нагріваються. Товщина поду залежить від розмірів робочого простору й температури печі.

Приймаємо тришаровий под: основна частина – шамот класу Б; нижня частина – з діатомової або піношамотної цегли; обмазка поду – магнезит; ззовні обшивка – металевим листом.

При виконанні розрахунків приймаємо товщину поду рівною товщині стіни. Додатково враховуємо верхній шар поду, який виконується з магнезиту або хромомагнезиту товщиною 60 мм.

Вибір кладки печі розглянемо на прикладі:

Приклад: Вибрати кладку печі й визначити її зовнішні розміри, якщо температура печі 1300 °С, ширина поду 1000 мм, довжина 1500 мм, висота робочого простору 800 мм.

Вогнетривкі шари печі виконуємо із шамоту класу Б товщиною в одну цеглу – 230 мм.

Теплоізоляційні шари стін і поду виконуємо з діатомової цегли $\frac{1}{2}$ – 115 мм.

Для захисту від механічного впливу й усунення фільтрації газів застосовуємо кожух товщиною 4 мм.

Звід печі виконується аркового типу. Вогнетривкий шар виконується із шамотної фасонної (клин-торець) і прямої цегли. Товщина вогнетривкого шару 230 мм. Для зменшення втрат тепла через кладку зверху здійснюємо засипання інфузорною землею й покриваємо ущільнювальною обмазкою. Товщина засипання 115 мм.

Под печі виконується тришаровим:

1-й шар – хромомагnezит (товщина 60 мм);

2-й шар – шамот (товщина 230 мм);

3-й шар – діатоміт (товщина 115 мм).

2.4.4. Розміри вікна завантаження/вивантаження

Висоту вікна приймаємо рівною $H_{\text{вікна}} = 300$ мм, ширину вікна $B_{\text{вікна}} = 2/3 B$, де B – ширина робочого простору печі.

2.4.5. Ескіз печі

Виконати ескіз печі, як подано на рис. 3, з урахуванням вибраних даних.

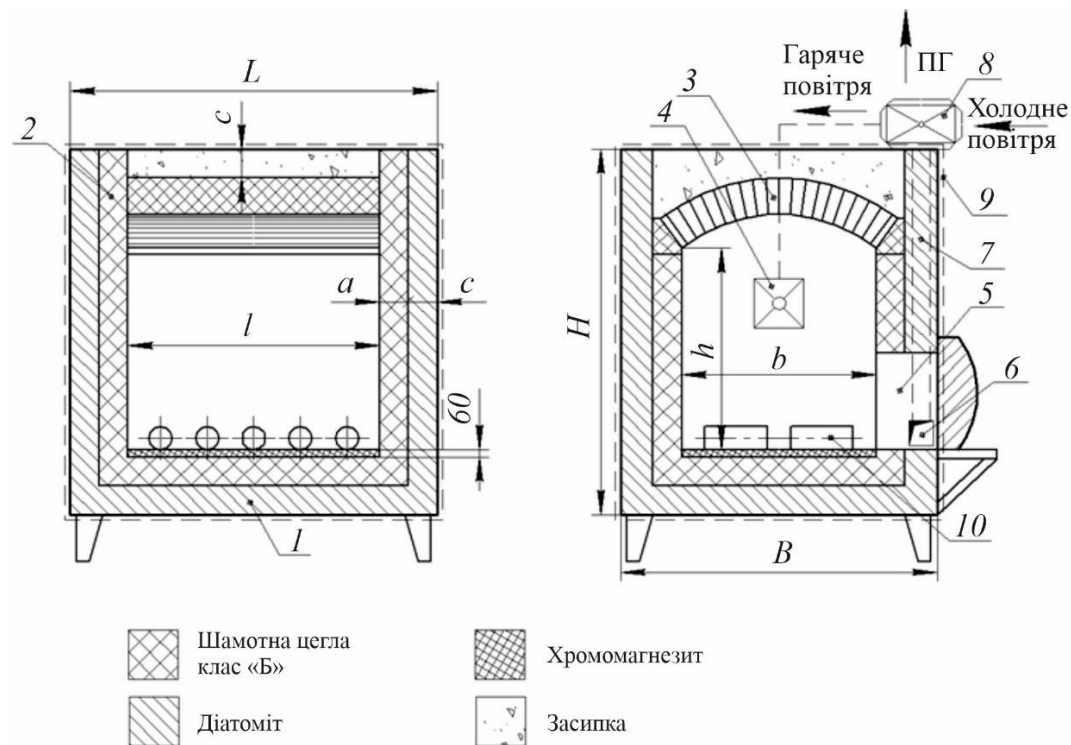


Рисунок 3 – Компонування печі:

1 – под; 2 – стіна; 3 – арковий звід; 4 – полум'яна грілка; 5 – вікно для вивантаження-завантаження; 6 – вікно для відведення ПГ; 7 – канал для відведення ПГ; 8 – рекуператор; 9 – каркас; 10 – заготовка

Контрольні запитання

1. Визначення матеріалу нагрівальних печей.
2. Характеристика зводу печі.
3. Характеристика поду печі.
4. Визначення розміру вікна завантаження.
5. Визначення розмірів робочого простору печі.

2.5. Тепловий баланс. Визначення витрати палива

Тепловий баланс печі складають, виходячи з умови рівності тепла, що приходить (горіння палива та інших джерел), і суми статей витрати тепла на нагрівання метала і різні втрати.

2.5.1. Прибуткові статті балансу

Хімічна теплота палива визначається за формулою, кВт,

$$Q_x = B \cdot Q_n^p,$$

де B – невідома поки витрата палива, м³/з або кг/з; Q_n^p – нижча теплота згорання палива, кДж/м³ або кДж/кг.

Тепло, внесене підігрітим повітрям визначається за формулою, кВт,

$$Q_{\text{пов}} = B \cdot L_\alpha \cdot C_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}},$$

де L_α – дійсна витрата повітря на одиницю палива, м³/м³ або м³/кг; $C_{\text{пов}}$ – теплоємність повітря, Дж/(м³°С); $t_{\text{пов}}$ – температура підігрітого повітря.

Тепло від екзотермічної реакції горіння заліза визначається за формулою, кВт,

$$Q_{\text{екз}} = q \cdot G \cdot a,$$

де G – секундна вагова продуктивність, кг/з; a – вигар сталі. Для камерних ковальських печей $a = 0,02 \dots 0,03$; приймаємо $a = 0,02$; $q = 5650$ кДж/кг – кількість тепла, одержувана при окисненні 1 кг заліза.

2.5.2. Видаткові статті балансу

Тепло, затрачуване на нагрівання сталі визначається за формулою, кВт,

$$Q_1 = G \cdot C \cdot (t_k - t_n),$$

де C – середня теплоємність металу, Дж/(кг·°С); t_k і t_n – кінцева й початкова температура металу, °С.

Втрати тепла з газами, що виходять, визначаються за формулою, кВт,

$$Q_2 = 1,05 \cdot B \cdot V_{\alpha} \cdot C_{пз} \cdot t_{пз},$$

де V_{α} – об'єм газів на одиницю палива, м³/м³ або м³/кг; $C_{пз}$ – середня теплоємність продуктів згоряння, кДж/(м³·°C) (визначаємо приблизно за таблицею); $t_{пз}$ – температура газів, що виходять із печі, приймаємо рівною температурі печі – $t_{п}$, °C; 1,05 – коефіцієнт врахування підсмоктування холодного повітря.

$t_{зг}$, °C	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
$C_{пз}$, кДж/(кг·°C)	1,42	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,57	1,59	1,61

Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння палива визначаються за формулою, кВт,

$$Q_3 = B \cdot Q_{н}^p \cdot k_{зг},$$

де $k_{зг}$ – коефіцієнт неповноти згоряння, $k_{зг} = 0,01 \dots 0,04$, приймаємо $k_{зг} = 0,02$.

Втрати тепла через кладку, відкрите вікно й невраховані втрати визначаються за формулою, Вт,

$$Q_4 = Q_{кл} + Q_{отв} + Q_{неврах}.$$

1) Теплопровідності використовуваних матеріалів:

Двошарова кладка:

Середня температура

- внутрішнього шару: $t_1 = 0,5 \cdot (t_{п} + t_{пов})$,

- зовнішнього шару: $t_2 = 0,5 \cdot (t_1 + t_{пов})$,

де $t_{пов}$ – температура навколишнього повітря (приймаємо $t_{пов} = 20$ °C),

$t_{п}$ – температура робочого простору печі.

Теплопровідності використовуваних матеріалів мають такі значення, Вт/(м·°C):

- шамот (внутрішній шар) $\lambda = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} t_1$.

- діатомітова цегла (зовнішній шар) $\lambda = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} t_2$.

Значення теплопровідності шарів необхідно вибрати за середніми температурами, які можна обчислити за формулами:

Тришарова кладка:

Середня температура:

- внутрішнього шару $t_1 = 0,5 \cdot (t_{\text{п}} + t_2)$,
- проміжного шару $t_2 = 0,5 \cdot (t_{\text{п}} + t_{\text{пов}})$,
- зовнішнього шару $t_3 = 0,5 \cdot (t_2 + t_{\text{пов}})$,

де $t_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря (приймаємо $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$),
 $t_{\text{п}}$ – температура робочого простору печі.

Теплопровідності використовуваних матеріалів мають такі значення, Вт/(м·°C):

- шамот (проміжний шар) $\lambda = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} t_2$;
- хромомангнетит (внутрішній шар) $\lambda = 7,2 - 4,2 \cdot 10^{-3} t_1$;
- діатомітова цегла (зовнішній шар) $\lambda = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} t_3$.

Значення теплопровідності шарів необхідно вибрати за середніми температурами.

2) Суми теплових опорів окремих частин кладки R , м²·°C/Вт :

- поду: $R_{\text{под}} = S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + S_3/\lambda_3$, де S_1, S_2, S_3 – товщини шарів поду; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – відповідні їм теплопровідності, перелічені для тришарової кладки;

- зводу: $R_{\text{звід}} = S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2$, де S_1, S_2 – товщини шарів зводу; λ_1, λ_2 – відповідні їм теплопровідності, перелічені для двошарової кладки;

- стінки: $R_{\text{стін}} = S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2$, де S_1, S_2 – товщини шарів стінок; λ_1, λ_2 – відповідні їм теплопровідності, перелічені для двошарової кладки.

3) Площі зовнішніх поверхонь, м²:

- передня й задня стінки: $F_{\text{пс}} = F_{\text{зс}} = L_{\text{н}} \cdot H_{\text{н}}$;

- торцеві стіни: $F_{\text{тс}} = B_{\text{н}} \cdot H_{\text{н}}$;

- звід: $F_{\text{з}} = B_{\text{н}} \cdot L_{\text{н}}$;

- под: $F_{\text{п}} = B_{\text{н}} \cdot L_{\text{н}}$,

де $B_{\text{н}}, L_{\text{н}}, H_{\text{н}}$ – зовнішні розміри печі.

4) Коефіцієнти тепловіддачі для зовнішніх поверхонь кладки α , Вт/(м²·°C):

- зводу – 35,
- стін – 25,
- поду – 15.

5) Теплові втрати кладкою в навколишній простір

Для обчислення втрат скористаємося формулою

$$Q = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F}{(1/\alpha_{\text{г}} + \sum \frac{S_i}{\lambda_i} + 1/\alpha)},$$

де $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{пов}}$ – відповідно температура газів у печі й навколишнього її повітря, °C; F – зовнішня поверхня кладки, м²; $\alpha_{\text{г}}$ і α – коефіцієнти тепловіддачі, Вт/(м²·°C); λ_i – теплопровідність i -го шару, Вт/(м·°C); S_i – товщина шару, м; $1/\alpha_{\text{г}}$ – тепловий опір тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні кладки, приймаємо рівним $1/348 = 0,003$ м²·°C/Вт.

• Втрати зводом, Вт: $Q_{\text{звід}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{звід}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{звід}} + 1/\alpha)}$.

• Втрати подом, Вт: $Q_{\text{під}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{під}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{под}} + 1/\alpha)}$.

• Втрати торцевими стінами, Вт: $Q_{\text{тс}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{тс}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{стін}} + 1/\alpha)}$.

• Втрати передньою й задньою стінками, Вт: $Q_{\text{зпс}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{пс}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{стін}} + 1/\alpha)}$.

• Сумарні втрати кладкою, Вт: $Q_{\text{кл}} = Q_{\text{звід}} + Q_{\text{під}} + 2 \cdot Q_{\text{тс}} + 2 \cdot Q_{\text{зпс}}$.

6) Втрати тепла через відкрите вікно, Вт:

$$Q_{\text{відкр}} = C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{отв}} \cdot \tau_{\text{відкр}} \cdot k_{\text{д}},$$

де $\tau_{\text{відкр}}$ – час відкриття вікна; $\tau_{\text{відкр}} = \tau_{\text{нагр}} \cdot 0,3$, де $\tau_{\text{нагр}}$ – розрахунковий час нагрівання, год; $F_{\text{отв}}$ – площа отвору, $F_{\text{отв}} = H_{\text{вікна}} \cdot B_{\text{вікна}}$; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла $C_0 = 5,7$ Вт/(м·°C); $k_{\text{д}}$ – коефіцієнт діафрагмування; $k_{\text{д}} = (1 + \phi_{1-2})/2$, де ϕ_{1-2} – кутовий

коефіцієнт із поверхні F_1 на F_2 ; $\varphi_{1-2} = L / (L + S)$, де L – еквівалентний розмір порожнини вікна; S – товщина вікна, відповідає товщині стіни;

$$L = \frac{4 \cdot a \cdot b \cdot s}{2 \cdot (a \cdot b + b \cdot s + s \cdot a)},$$

де a , b , s – висота, ширина й товщина вікна

відповідно.

7) Інші втрати:

Невраховані втрати приймаємо рівними 5 % від втрат тепла кладкою в навколишній простір, Вт,

$$Q_{\text{неврах}} = (Q_{\text{кл}} + Q_{\text{відкр}}) \cdot 0,05.$$

Тоді, втрати теплоти через кладку, відкрите вікно та інші втрати, Вт,

$$Q_4 = Q_{\text{кл}} + Q_{\text{відкр}} + Q_{\text{неврах}}.$$

2.5.3. Рівняння теплового балансу

Визначивши прибуткові й видаткові статті балансу складемо рівняння теплового балансу

$$Q_x + Q_{\text{екз}} + Q_v = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4.$$

Розв'язуємо рівняння й знаходимо B – витрату палива, кг/с.

Обчислюємо значення окремих статей балансу (Q_x , Q_v , Q_2 , Q_3), пов'язаних з витратою палива B .

Отримані результати записуються в таблицю 8.

Таблиця 8 – Видаткові статті балансу

Статті приходу теплоти	Числове значення		Статті витрат теплоти	Числове значення	
	кВт	%		кВт	%
Хімічна теплота палива			На нагрівання сталі		
Фізична теплота повітря			З димовими газами		
Теплота екзотермічної реакції			З хімічним недопалом		
			Втрати через кладку, відкрите вікно та інші втрати		
Усього:			Усього:		

Контрольні запитання

1. Визначення прибуткової статті балансу.
2. Визначення тепла внесеного підігрітим повітрям.
3. Визначення тепла від екзотермічної реакції горіння.
4. Визначення видаткової статті балансу.
5. Визначення рівняння теплового балансу.
6. Визначення втрат тепла.

2.6. Основні техніко-економічні показники роботи печі

Для характеристики роботи печі вводяться наступні показники:

Термічний ККД визначається за формулою

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{Q_{\text{мет}}}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100 \% .$$

Ефективний ККД визначається ефективність використання палива і визначаються за формулою

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{мет}}}{Q_{\text{палива}}} \cdot 100 \% .$$

Питома витрата палива (на нагрівання 1кг (т) металу) визначаються за формулою

$$b = \frac{B}{G} ,$$

де B – витрата палива, кг/год.

Питома витрата умовного палива визначаються за формулою

$$b_{\text{умов}} = \frac{B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}}}{G \cdot 29300} ,$$

де B – витрата палива, кг/год.

Напруженість площі поду визначаються за формулою

$$b = \frac{G}{F_{\text{пода}}} .$$

Контрольні запитання

1. Визначення термічного ККД.
2. Визначення ефективного ККД.
3. Визначення питомої витрати палива.
4. Визначення питомої витрати умовного палива.
5. Визначення напруженості площі поду.

3. ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС HEAT v3.5 Professional

Створений програмний комплекс HEAT v3.5 Professional (HEAT), який за реальними параметрами заготовки, що нагрівається, та умовами нагрівання, автоматично, або з коригуваннями користувача вибирає раціональні режими нагріву (камерні або методичні) і виконує їх розрахунки. Крім того, HEAT автоматично контролює якість нагрівання й підбирає оптимальний варіант нагрівання, що відповідає заданим умовам. Створена система подає результати розрахунку у вигляді графіків, ескізів та звітів [18–20].

Програма є навчальною й дозволяє досліджувати вплив температури печі, матеріалу заготовки, складу палива на процес нагрівання.

В існуючих і проєктованих нових ковальсько-пресових цехах (КПЦ) досягнення стабільних техніко-економічних показників високого рівня пов'язано в основному з автоматизацією теплових процесів. Вона полягає в застосуванні пристроїв завантаження й вивантаження печей, автоматичній витримці заготовок у печі заданий час при заданій температурі, застосування різноманітних пристроїв контролю температурного режиму.

Підвищити енерготехнологічну ефективність ковальсько-штампувального виробництва можна лише при комплексній автоматизації процесів нагрівання, тобто в рамках створення АСУ. Остання повинна охоплювати процеси підготовки й проведення нагрівання заготовок, починаючи від визначення температури заготовки, часу нагрівання й закінчуючи процесами завантаження/вивантаження печей, а також контролю режимів їх роботи на основі науково обґрунтованих математичних моделей.

Існує значна кількість методик розрахунків часу нагрівання заготовок під кування й об'ємне штампування, але більшість із них досить громіздкі, хоча й базуються на досить грубих припущеннях. Це призводить до зниження точності, втрачається фізична сутність процесу. Використання цих методик призводить до значних втрат при нагріванні, вони мало придатні для навчання студентів, тому що найчастіше не відображають фізичний зміст процесу.

У зв'язку із цим виникає необхідність розробки більш реальних методик розрахунків, що дозволяють підвищити якість кінцевого результату й зберегти основні принципи процесу нагрівання заготовок.

Це дозволить студентам закріпити вивчений матеріал і зробити його більш доступним. Для реалізації такої методики на практиці був створений

сучасний програмний комплекс, що включає в себе елементи для машино-експериментального аналізу й для аналітичного дослідження процесу нагрівання.

Спосіб визначення часу нагрівання ґрунтується на рівнянні теплопровідності Фур'є, що одержало широке розповсюдження, розглянутий у багатьох працях [9, 12, 13], але найбільше широко – у виданнях за редакцією А. С. Телегіна [9, 12].

У результаті розв'язку рівняння теплопровідності Фур'є $\frac{\partial T}{\partial \tau^2} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ професором Б. В. Старком була отримана формула для визначення часу нагрівання [13]:

$$\tau = \frac{S \cdot \rho \cdot C_p}{k_1 \cdot \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{поч}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{кін}}},$$

де τ – час нагрівання, год; $t_{\text{печ}}$ – температура печі, °С; $t_{\text{поч}}$ – початкова температура виробу, °С; $t_{\text{кін}}$ – кінцева температура виробу, °С; k_1 – коефіцієнт, залежний від форми тіла, що нагрівається; α – коефіцієнт теплопередачі на поверхню, м²/год; S – товщина шару, що прогрівається, м; ρ – щільність матеріалу виробу, що нагрівається, кг/м³; C_p – середня теплоємність, кДж/(кг °С).

Даний спосіб враховує теплофізичні параметри матеріалу, що нагрівається, а так само багато умов температурного режиму, завдяки чому має більш високу точність у порівнянні з розглянутими вище способами визначення тривалості нагрівання. Але й дана формула має істотні недоліки:

- 1) розрахунки проводяться за усередненими параметрами за весь період розрахунків, що призводить до зниження точності розрахунків;
- 2) при розрахунках потрібна значна кількість довідкової літератури;
- 3) дуже висока трудомісткість розрахунків.

Розроблений програмний комплекс HEAT v3.5 Professional дозволяє автоматизувати розрахунки нагрівання металевих заготовок під кування й штампування в камерних і методичних печах. Дозволяє аналізувати вплив теплофізичних параметрів, виду палива, конструкції паливоспалювальних пристроїв і розташування заготовок на поді печі упродовж нагрівання, швидкість нагрівання, «масивність» тіла і т.д. Крім того, даний програмний продукт має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, довідкову систему й систему інтерактивних підказок і може використовуватися в навчальному процесі.

В основі математичної моделі використаної для розрахунків часу

нагрівання, в даній роботі застосовується формула Б. В. Старка, подана в критеріальному вигляді.

Температура поверхні виробу:

$$Tm[i] = Tpe - (Tpe - Tm[i - 1]) \cdot \exp\left(\frac{-k_1 \cdot \alpha \cdot \Delta\tau}{S \cdot \rho \cdot C_p \cdot m}\right),$$

де $Tm[i]$ – температура тіла на даному кроці ітерації, °С; $Tm[i - 1]$ – температура тіла на попередньому кроці ітерації, °С; Tpe – температура печі, °С; $\Delta\tau$ – інтервал часу, що задається користувачем; ρ – щільність сталі, г/см³; C_p – теплоємність металу, кДж/(кг·°С); k_1 – коефіцієнт, що залежить від форми тіла; S – товщина нагрівання, м; m – коефіцієнт, що враховує масивність заготовки; α – сумарний коефіцієнт теплопередачі, що враховує променистий і конвективний теплообмін, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Метод базується на послідовному наближенні до необхідної температури нагрівання. Температура нагрівання обчислюється на коротких інтервалах $\Delta\tau$ з використанням теплофізичних параметрів матеріалу відповідно до значення середньої температури на i -му інтервалі, поки $\Delta\tau$ не забезпечить точність досягнення необхідної температури, рівної 2%. Потім час на всіх коротких інтервалах підсумовується (рис. 4).

У такий спосіб час нагрівання визначається за формулою

$$\tau = \sum_n^{i=0} \Delta\tau[i],$$

де n – число кроків ітерації.

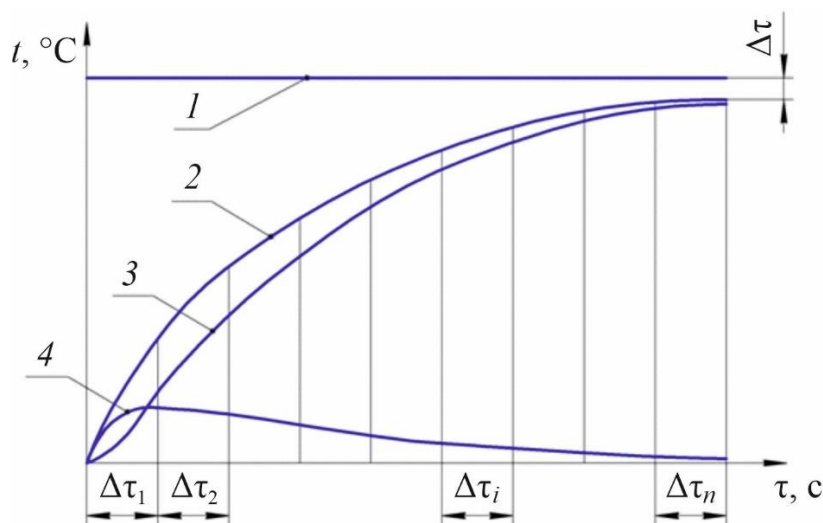


Рисунок 4 – Схема визначення часу нагрівання:

- 1 – кінцева температура нагрівання; 2 – температура поверхні заготовки;
- 3 – температура осі заготовки; 4 – різниця температур по перерізу

З метою розширення можливостей використання рівняння за величиною числа Біо в нього вводять коефіцієнт масивності m

$$m = 1 + [(k_3 - 1)/(k_2 \cdot k_3)]Bi,$$

де k_2, k_3 – коефіцієнти залежно від форми тіла й числа Біо.

Повна методика розрахунків нагрівання заготовок містить у собі розрахунки горіння палива, розрахунки часу нагрівання заданої заготовки для кування (штамбування) у камерній печі, визначення розмірів робочого простору печі, побудову ескізу поду печі, вибір кладки, компоновання печі, побудову ескізу печі, розрахунки теплового балансу, визначення витрати палива, розрахунки основних техніко-економічних показників роботи печі, розрахунки допустимих і реальних температурних напруг, визначення режиму нагрівання, розрахунки методичного режиму нагрівання.

Використання такої методики дозволяє значно підвищити точність розрахунків часу нагрівання.

3.1. Загальна характеристика

HEAT v3.5 Professional є Windows додатком, створеним з використанням найсучасніших технологій і інструментів. Інтерфейс і функціонал програми відповідає найвищим вимогам. Варто так само відзначити, що в новій версії програмного продукту з'явилася підтримка скинів, що зробило інтерфейс ще більш привабливим.

При розробці були використані такі технології й бібліотеки:

- двигун бази даних Microsoft Access Database Engine;
- технологія доступу до бази даних (БД) ADO .NET;
- бібліотеки Development Express;
- мова запитів SQL.

3.2. Характеристика програми

Структура програмного комплексу подана у вигляді схеми на рис. 5.

Програмний комплекс можна розбити на чотири великі модулі: камерний режим розрахунку, методичний режим розрахунку, модуль

доступу до БД сталей і головний модуль – HEAT v3.5 Professional. Кожен з модулів пов'язаний з модулем доступу до БД сталей.



Рисунок 5 – Структурна схема програми у спрощеному вигляді

Модулі «Камерний режим розрахунку» і «Методичний режим розрахунку» можна вважати самостійними частинами, які так само мають свої підмодулі.

Модуль «Камерний режим розрахунку» має такі підмодулі:

- 1) модуль обробки вхідних даних зберігає вихідні дані, забезпечує відкритий доступ до них;
- 2) модуль розрахунків виконує усі розрахунки, поділяється на безліч процедур і підмодулів, відповідальних за окремі етапи обчислень;
- 3) модуль автоматки;
- 4) модуль побудови ескізів;
- 5) модуль побудови графіків;
- 6) модуль створення звітів служить для обробки результатів розрахунків, дозволяє створювати звіт в MS Word за результатами розрахунків;
- 7) модуль «Лабораторія» дозволяє змінювати основні проміжні параметри розрахунків (температурний режим, розміщення заготовок на поді і т.д.), тим самим впливаючи на результат.

Модуль «Методичний режим розрахунку» має такі підмодулі:

- 1) модуль обробки вхідних даних;
- 2) модуль розрахунків;
- 3) модуль побудови графіків;
- 4) модуль створення звітів;
- 5) модуль автоматки.

3.2.1. Загальний алгоритм роботи програми

Загальний алгоритм показує всю послідовність дій після натискання на кнопку «Розрахунок». Алгоритм у збільшеному вигляді представлений на рис. 6.

Після натискання на кнопку «розрахунок» проводиться зчитування введених користувачем вихідних даних і запис їх у відповідні змінні. Після цього залежно від обраного палива (рідкого або газоподібного) вибирається відповідна схема розрахунків горіння палива. Далі іде розрахунок часу нагрівання й компонування поду. Якщо обрана опція розрахунку коефіцієнта $C_{Г.К.М}$, то проводиться його розрахунок і перерахунок часу нагрівання, розмірів поду й розміщення заготовок, якщо ж розрахунок коефіцієнта $C_{Г.К.М}$ не включений, то ці дії пропускаються. Далі, якщо обраний автоматичний розрахунок, то проводиться перевірка температури горіння палива, автоматичний добір відстані між заготовками й рядами на поді печі й вибір числа рядів і заготовок у ряді з метою забезпечення необхідної продуктивності, завантаження поду й нормального співвідношення довжини печі до її ширини. Якщо автоматичний розрахунок виключений, то всі ці параметри вибираються з «лабораторії», які були задані користувачем. Після цього відбувається вибір кладки печі й визначення її зовнішніх розмірів, за ним іде розрахунок теплового балансу й техніко-економічних показників, побудова графіка нагрівання, формування короткого звіту за результатами розрахунків, виведення рекомендацій, обробка основних параметрів печі системою інтерактивних підказок, побудова ескізу поду й печі за результатами розрахунків. Якщо необхідно, створюється повний звіт і зберігається у файл.

3.2.2. Структура програми

Програма HEAT v3.5 Professional дозволяє виконувати розрахунки нагрівання металевих заготовок під кування й штампування в камерних і методичних печах. Для камерних печей програмний комплекс дозволяє робити не тільки розрахунки режиму нагрівання, але й повний розрахунок камерної печі, а також аналіз впливу теплофізичних параметрів, параметрів палива й паливоспалювальних пристроїв і розташування заготовок на поді печі під час нагрівання, швидкість нагрівання, «масивність» тіла і т.д.

До таких параметрів відносять:

- 1) розміри заготовки, що нагрівається (діаметр і довжина);
- 2) марка матеріалу заготовки;

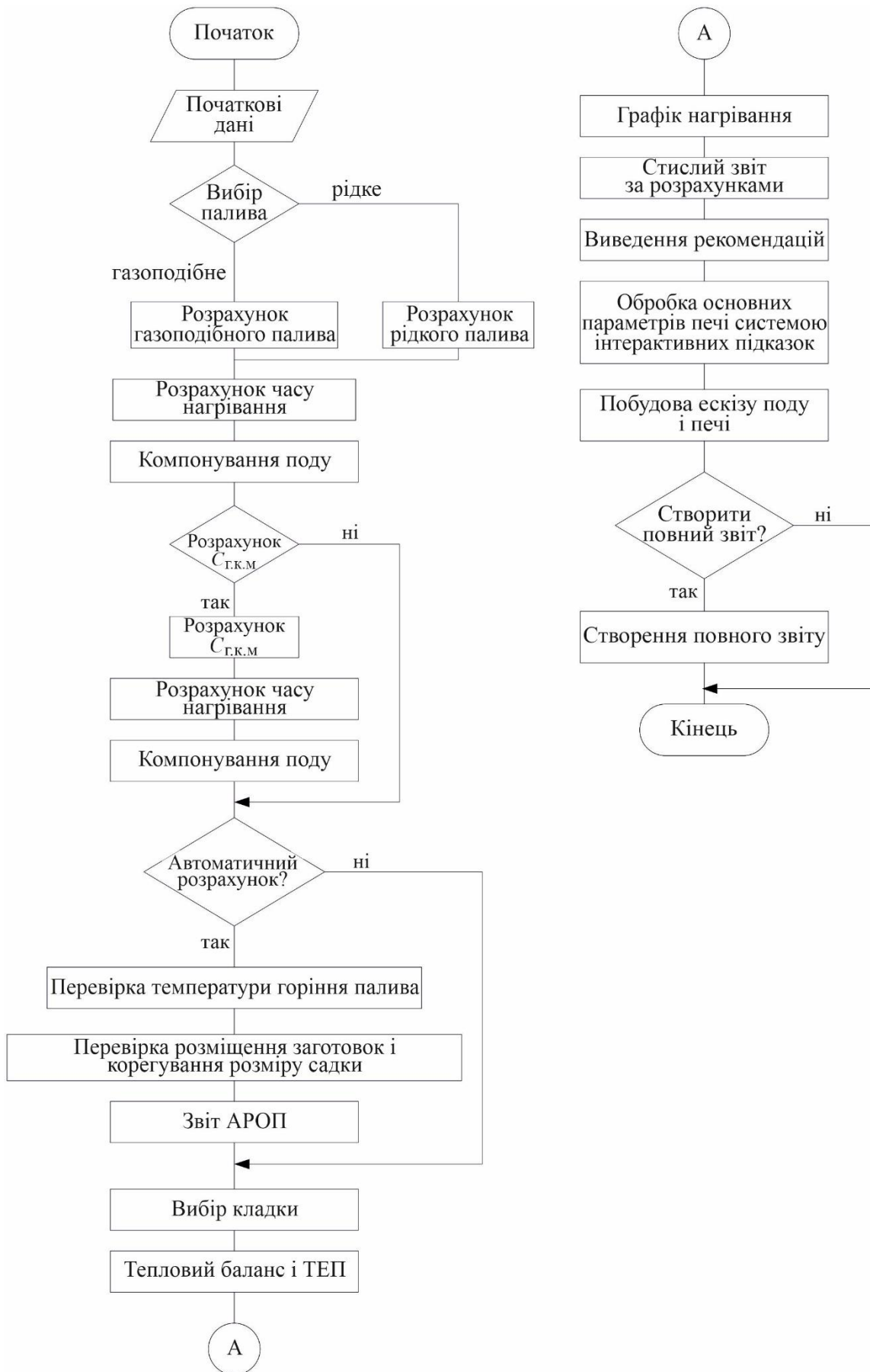


Рисунок 6 – Загальний алгоритм розрахунків

- 3) температура робочого простору печі;
- 4) початкова й кінцева температури заготовки, що нагрівається;
- 5) ККД пального;
- 6) вид і склад палива;
- 7) розміщення заготовок:
 - відстань між заготовками;
 - відстань між рядами;
- 8) кількість рядів і кількість заготовок у ряді.

Для методичних печей в програмному комплексі реалізований розрахунок режиму нагрівання, який може бути 2-х, 3-х і 4-зонним. HEAT v3.5 Professional дозволяє аналізувати вплив параметрів заготовки на режим нагрівання, вплив швидкості нагрівання на термічні напружки, що виникають, вплив обраного режиму нагрівання на час нагрівання і т.д.

Насамперед, слід зазначити головні особливості програми:

Простота використання. Від користувача потрібно тільки ввести склад палива, діаметр заготовки, довжину заготовки, вибрати марку сталі й натиснути кнопку «Автоматичне визначення». Програма сама вибере необхідний режим нагрівання й зробить його розрахунок.

При розрахунках камерного режиму нагрівання програмний комплекс розраховує всі необхідні параметри, при обчисленні формул вибере необхідні коефіцієнти. Також у програмі міститься вбудована база даних сталей, з якої автоматично вибираються всі необхідні параметри: час кінця й початку кування, теплоємність, щільність і теплопровідність обраної сталі.

При розрахунках методичного режиму нагрівання програма сама визначає оптимальну швидкість нагрівання, підбирає необхідний режим нагрівання 2-, 3- або 4-зонний.

Автоматичний режим розрахунку. Вбудована система АРОП (Автоматичний розрахунок оптимальних параметрів) – автоматично вибирає температурні режими нагрівання (температуру печі й температуру кінця нагрівання), сама вибирає число рядів і число заготовок у ряді так, щоб забезпечувалася необхідне значення садки й оптимальне співвідношення довжини печі до її ширини. Також АРОП стежить за тим, щоб забезпечувався оптимальний коефіцієнт завантаження поду, продуктивність поду і належна температура горіння палива. Якщо коефіцієнт завантаження поду занадто малий, то заготовки будуть

розкладені щільніше й буде виконаний повний перерахунок. Якщо продуктивність поду занадто велика, то відстань між заготовками буде збільшено. Також може виникнути ситуація, коли згоряння заданого палива не може забезпечити потрібну температуру печі. У цьому випадку АРОП запропонує підвищити ККД пальника або ж температуру повітря, що подається разом з паливом.

Програмний комплекс в автоматичному режимі здійснює контроль допустимих виникаючих термічних напруг і надає рекомендації з приводу режиму нагрівання.

Лабораторний режим при розрахунку камерної печі. Якщо користувача не влаштовує результат роботи АРОП, він може виключити його, вибравши режим «Лабораторний розрахунок». У цьому режимі користувач сам може вибрати температурний режим, число рядів і кількість заготовок у ряді та інші параметри. Він сам підбирає необхідні значення, щоб забезпечити оптимальні розміри печі, значення садки, коефіцієнт завантаження поду, температуру горіння палива і т.д. Але навіть у цьому випадку АРОП працює в пасивному режимі, він буде сповіщати користувача, якщо який-небудь із параметрів виходить за допустимі значення.

Точність розрахунків. Для камерної печі уперше був реалізований розрахунок коефіцієнта $C_{г.к.м}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – наведеного коефіцієнта випромінювання між продуктами горіння, внутрішньою поверхнею стіни й поверхнею металу. Даний коефіцієнт залежить від розміщення й розмірів заготовок, складу продуктів горіння, а отже, від складу палива й від розмірів робочого простору печі. Розрахунки даного коефіцієнта дозволяють значно підвищити точність розрахунків часу нагрівання заготовки й усіх інших параметрів.

Крім того, у програмному комплексі є вбудований марочник сталей, що містить усі необхідні фізичні й механічні властивості матеріалів, завдяки чому на кожному температурному інтервалі приймаються реальні теплофізичні властивості, а не усереднені за весь період нагрівання. Це так само дозволяє значно підвищити точність розрахунків.

Повне розв'язання поставленого завдання. Крім розрахунків числових значень, програма автоматично будує ескіз поду, ескіз печі й графіки нагрівання заготовки.

Збереження роботи. Якщо користувачеві потрібно зробити перерву або потрібно продовжити роботу наступного разу, то в будь-який момент можна зберегти введені вихідні дані й параметри лабораторії у файл, а потім завантажити їх знову й продовжити роботу. Для зберігання вихідних даних програма використовує свій власний формат файлу *.hat.

Звіти й збереження результатів. У вікні програми можна переглянути тільки основні параметри печі й короткий звіт. Тому передбачена можливість створити повний звіт, у який входять результати всіх розрахунків, ескізи печі й поду. Для створення повного звіту у форматі *.doc необхідно, щоб на комп'ютері була встановлена програма Microsoft Office Word. Для автоматизації роботи із цим офісним пакетом була використана технологія **OLE** (*Object Linking and Embedding*). Основна перевага використання OLE, крім зменшення розміру файлу, у тому, що вона дозволяє створити головний файл, картотеку функцій, до якої звертається програма. Цей файл може оперувати даними з вихідної програми, які після обробки повертаються у вихідний документ.

Висока надійність. Дуже велика увага була приділена обробленню можливих виключень, тобто ситуацій, які можуть призвести до помилки в програмі. На кожному етапі роботи програма контролює дані, що вводяться користувачем, і обмежує введення невірних або ж свідомо неправильних даних, які зазвичай можуть призвести до краху програми. Так, наприклад, при введенні дробових чисел програма не зважає, що ви будете використовувати десятковий роздільник – крапку або кому, бо при введенні програма сама підставить потрібний знак.

База даних сталей. У програмі є база даних марок сталей, з усіма необхідними теплофізичними параметрами для розрахунків. Крім цього, є можливість додавати свої марки сталей або ж вносити корегування. Спеціально для розв'язання цієї проблеми був розроблений вбудований «марочник сталей» – це значно підвищує гнучкість і універсальність програми.

Розрахунки температурних напружень. Уперше в HEAT v3.5 Professional був реалізований розрахунок температурних напружень. Програмний комплекс обчислює реальні й допустимі температурні напруження на кожному з етапів нагрівання, завдяки цьому є можливість правильно підібрати режим нагрівання, а також зробити нагрівання

«безпечним», тобто в процесі нагрівання не будуть виникати термічні тріщини, які в остаточному підсумку призведуть до браку.

Довідкова система. Програма оснащена повною довідковою системою. При виникненні будь-яких питань з використання програми користувачу досить натиснути F1 або зайти в довідкову систему через головне меню.

3.3. Початок роботи

Для початку роботи із програмою необхідно запустити файл «HEAT.exe», після чого з'явиться головне вікно програми, яке має вигляд, зображений на рис. 7.

Головне вікно програми можна умовно розбити на 4 області, як показано на рис. 7.

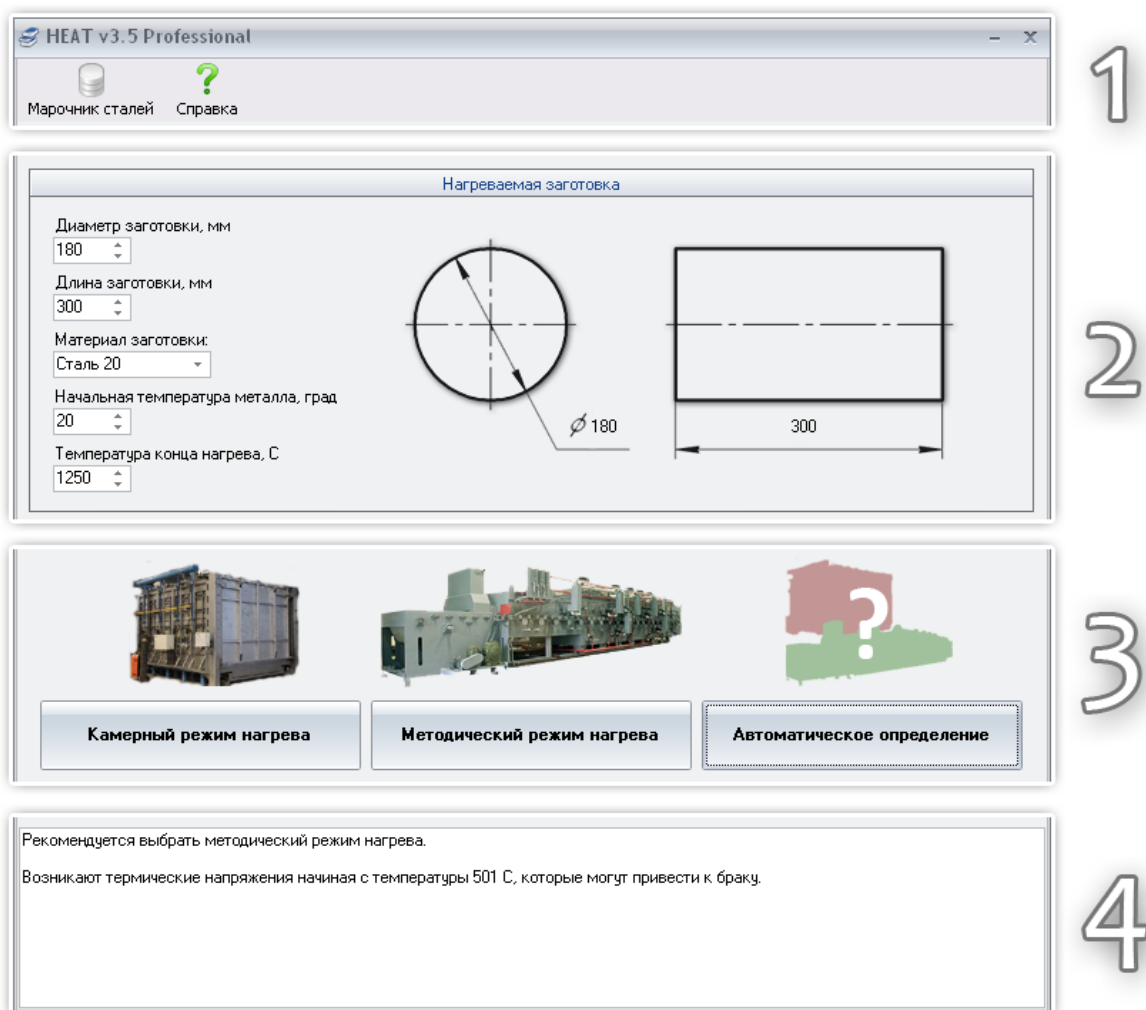


Рисунок 7 – Головне вікно програми:

1 – панель інструментів; 2 – вихідні дані; 3 – кнопки завдань; 4 – панель підказок

Панель завдань служить для запуску марочника сталей і виклику довідки.

Для початку роботи досить мати мінімальний набір: діаметр заготовки, довжину заготовки, марку сталі, початкову й кінцеву температуру металу. Усі ці дані вводяться у відповідні поля. Крім цього для зручності сприйняття наведені схематичні зображення заготовки, що нагрівається, з розмірами, причому поля введення пов'язані з зображеними на схемі, як показано на рис. 8. Це робить програмний комплекс ще більш наочним і простим для розуміння, що має дуже велике значення при його використанні навчальної програми.

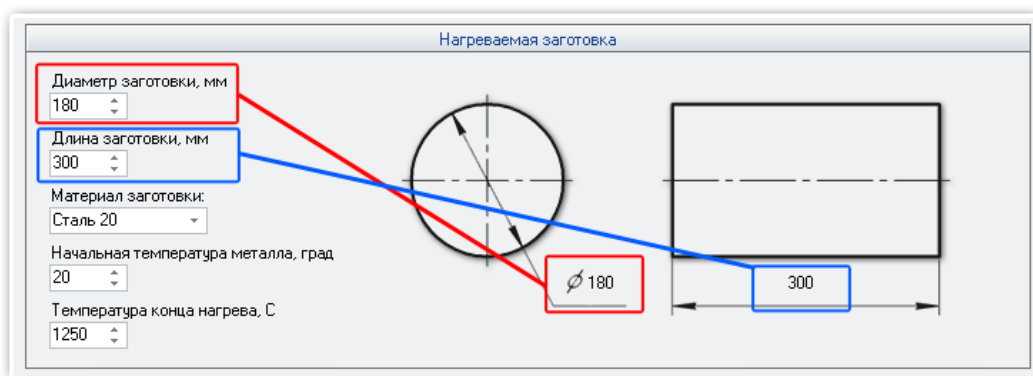


Рисунок 8 – Вихідні дані

Нижче панелі з вихідними даними розташовано три кнопки для вибору необхідного режиму розрахунків, показаному на рис. 9.

У програмному комплексі доступні три режими розрахунків: камерний режим розрахунку, методичний режим розрахунку і автоматичне визначення.



Рисунок 9 – Кнопки вибору режимів:

1 – камерний режим розрахунку; 2 – методичний режим розрахунку;
3 – автоматичне визначення

Кнопки «Камерный режим розрахунку» і «Методичний режим розрахунків» переходять до відповідних режимів розрахунку.

При натисканні кнопки «Автоматичне визначення» відбувається перевірка припустимих термічних напруг, що виникли у процесі нагрівання, і залежно від цього програмний комплекс дає рекомендації з вибору режиму нагрівання, як показано на рис. 10.

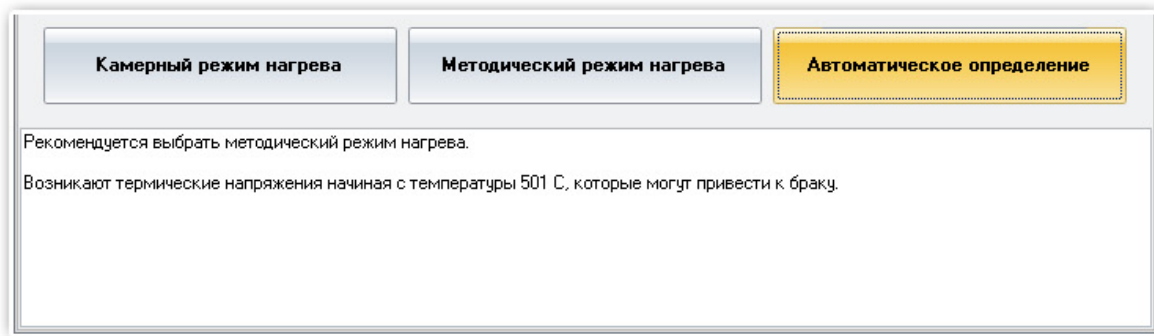


Рисунок 10 – «Автоматичне визначення»

При роботі із програмою рекомендується використовувати «Автоматичне визначення», хоча користувач має повне право відразу вибрати потрібний режим нагрівання.

3.4. Камерний режим нагрівання

Камерний режим нагрівання – це режим нагрівання заготовок у печі з постійною робочою температурою робочого простору печі. У програмному комплексі HEAT v3.5 Professional він реалізований у розширеному вигляді й містить:

- 1) розрахунок горіння палива;
- 2) розрахунок часу нагрівання заданої заготовки для кування (штампування) у камерній печі;
- 3) визначення розмірів робочого простору печі;
- 4) побудову ескізу поду печі;
- 5) вибір кладки, компонування печі;
- 6) побудову ескізу печі;
- 7) розрахунок теплового балансу;
- 8) визначення витрати палива;
- 9) розрахунок основних техніко-економічних показників роботи печі.

Для переходу до камерного режиму нагрівання необхідно в головному вікні натиснути на кнопку «Камерний режим нагрівання», як показано на рис. 11).

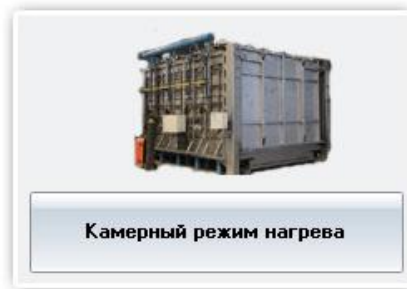


Рисунок 11 – Кнопка wyboru камерного режиму нагрівання

Після переходу до камерного режиму нагрівання з'явиться вікно «HEAT v3.5 Professional – камерний режим нагрівання», як показано на рис. 12.

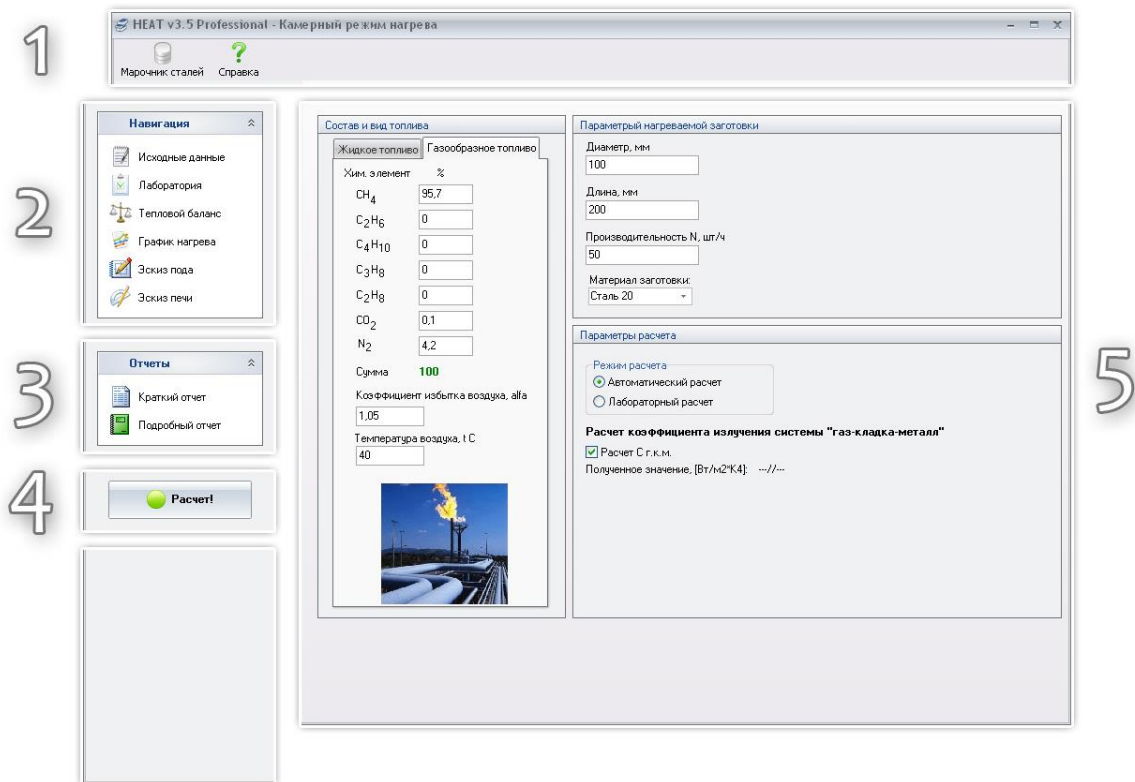


Рисунок 12 – Вікно «HEAT v3.5 Professional – камерний режим нагрівання»:

1 – панель інструментів; 2 – навігаційні кнопки; 3 – кнопки звітів;

4 – кнопка розрахунку; 5 – робоча область

Вікно «камерний режим нагрівання» можна умовно розділити на 5 частин, як показано на рис. 12: панель інструментів; навігаційні кнопки;

кнопки звітів; кнопка розрахунку; робоча область.

Роботу з камерним режимом розрахунку необхідно починати із введення вихідних даних, для цього потрібно на навігаційній панелі натиснути кнопку «Вихідні дані», після чого в робочій області з'являться необхідні поля для введення, як показано на рис. 13.

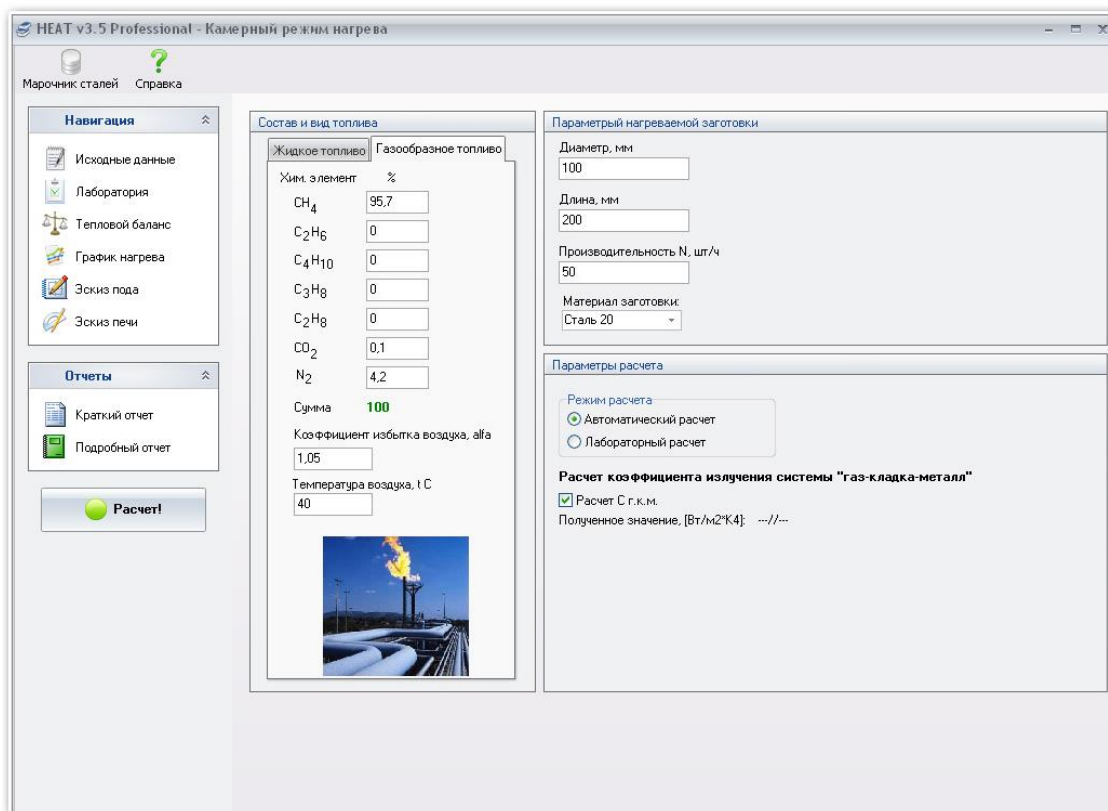


Рисунок 13 – Вкладка «Вихідні дані»

Як вихідні дані необхідно задати вид і склад палива. Паливо може бути рідким або газоподібним.

Для вибору газоподібного палива необхідно на панелі «Склад і вид палива» вибрати вкладку «Газоподібне паливо», як показано на рис. 14, і заповнити всі запропоновані поля, указати відсоткове співвідношення всіх хімічних елементів, наявних у газоподібному паливі, а також коефіцієнт надлишку повітря й температуру повітря, яке подається разом з паливом. При введенні хімічного складу програма для зручності користувача відразу ж обчислює суму введених хімічних елементів. Якщо сума не буде дорівнювати 100 %, розрахунок виконуватися не буде і з'явиться відповідне попередження на екрані персонального комп'ютера (ПК).

Для вибору рідкого палива необхідно на панелі «Склад і вид палива» вибрати вкладку «Рідке паливо», як показано на рис. 15, і заповнити всі

запропоновані поля, указати відсоткове співвідношення всіх хімічних елементів, наявних у рідкому паливі, відсоток вологи й золи, які, як правило, теж присутні у складі палива, а також коефіцієнт надлишку повітря й температуру повітря, що подається разом з паливом. При введенні хімічного складу програма для зручності користувача відразу ж обчислює суму введених хімічних елементів. Якщо сума не буде дорівнювати 100 %, розрахунок виконуватися не буде й з'явиться відповідне попередження на екрані ПК, крім цього сума буде підсвічена червоним кольором.

Состав и вид топлива

Жидкое топливо | Газообразное топливо

Хим. элемент	%
CH ₄	95,7
C ₂ H ₆	0
C ₄ H ₁₀	0
C ₃ H ₈	0
C ₂ H ₈	0
CO ₂	0,1
N ₂	4,2
Сумма	100

Коефициент избытка воздуха, alpha

1,05

Температура воздуха, t C

40




Рисунок 14 – Вкладка «Газоподібне паливо»

Состав и вид топлива

Жидкое топливо | Газообразное топливо

Хим. элемент	%
C (Г)	87,2
H (Г)	11,7
S (Г)	0,5
O2 (Г)	0,3
N2 (Г)	0,3
Сумма	100
A (P)	0,1
W (P)	2

Коефициент избытка воздуха, alpha

1,2

Температура воздуха, t C

300



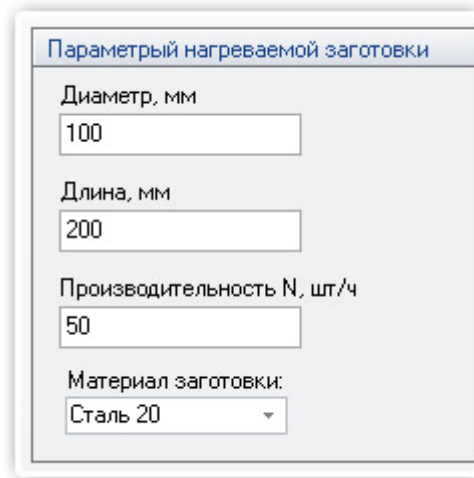
Рисунок 15 – Вкладка «Рідке паливо»

Після того як користувач вибере вид палива й введе його хімічний склад, необхідно буде ввести параметри вихідної заготовки:

– діаметр, мм;

- довжину, мм;
- матеріал заготовки, мм;
- продуктивність печі, шт/год.

Для цього передбачена панель «Параметри заготовки, що нагрівається», як показано на рис. 16. Матеріал заготовки вибирається зі списку сталей, які є в «марочнику сталей». Якщо ж потрібного матеріалу немає в списку, завжди є можливість додати будь-який необхідний матеріал, перейшовши на панель інструментів за кнопкою «Марочник сталей».



Панель «Параметри нагріваної заготовки»

Диаметр, мм: 100

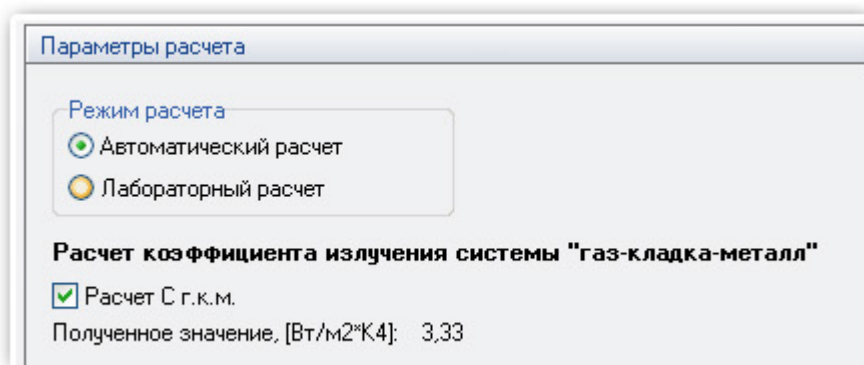
Длина, мм: 200

Производительность N, шт/ч: 50

Материал заготовки: Сталь 20

Рисунок 16 – Панель «Параметри заготовки, що нагрівається»

Після того як задано склад палива й зазначені параметри заготовки, що нагрівається, необхідно вибрати режим розрахунків і вказати, чи потрібно виконувати розрахунок $C_{г.к.м.}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, – коефіцієнта випромінювання системи «газ – кладка – метал» на панелі «Параметри розрахунків», як показано на рис. 17.



Панель «Параметри розрахунку»

Режим расчета:

- Автоматический расчет
- Лабораторный расчет

Расчет коэффициента излучения системы "газ-кладка-металл"

Расчет C г.к.м.

Полученное значение, [Вт/м²·К⁴]: 3,33

Рисунок 17 – Панель «Параметри розрахунків»

Є два режими розрахунків на вибір: «Автоматичний розрахунок» і «Лабораторний розрахунок».

Якщо обрано автоматичний режим розрахунків, то активується система АРОП (Автоматичний розрахунок оптимальних параметрів), яка автоматично вибирає температурні режими нагрівання (температуру печі й температуру кінця нагрівання), сама вибирає число рядів і число заготовок у ряді так, щоб забезпечувалася необхідна величина садки й оптимальне співвідношення довжини печі до її ширини. Також АРОП стежить за тим, щоб забезпечувався оптимальний коефіцієнт завантаження поду, продуктивність поду й температура горіння палива. Якщо коефіцієнт завантаження поду занадто малий, то заготовки будуть розкладені щільніше й буде виконано повний перерахунок. Якщо продуктивність поду занадто велика, то відстань між заготовками буде збільшена. Також може виникнути ситуація, коли згорання заданого палива не може забезпечити потрібну температуру печі. У цьому випадку АРОП запропонує підвищити ККД пальника або ж температуру повітря, що подається разом з паливом.

Рекомендується завжди використовувати автоматичний режим розрахунку, але якщо користувача не влаштовує результат роботи АРОП, він може виключити його, вибравши режим «Лабораторний розрахунок». У цьому режимі користувач сам може вибрати температурний режим, число рядів і кількість заготовок у ряді та інші параметри. Він сам підбирає необхідні значення, щоб забезпечити оптимальні розміри печі, значення садки, коефіцієнт завантаження поду, температуру горіння палива і т.д. Але навіть у цьому випадку АРОП працює в пасивному режимі, він буде сповіщати користувача, якщо який-небудь із параметрів виходить за допустимі значення.

Поставивши галочку «Розрахунок $C_{г.к.м}$ », можна опціонально вибрати розрахунок коефіцієнта $C_{г.к.м}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, наведеного коефіцієнта випромінювання між продуктами горіння, внутрішньою поверхнею стіни й поверхнею металу. Даний коефіцієнт залежить від розміщення й розмірів заготовок, складу продуктів горіння, а отже, від складу палива й від розмірів робочого простору печі. Розрахунок даного коефіцієнта дозволяє значно підвищити точність розрахунку часу нагрівання заготовки й усіх інших параметрів. Для технологічних розрахунків рекомендується завжди виконувати розрахунок даного коефіцієнта, але

для перевірочних розрахунків робіт студентів цю опцію можна виключити, у цьому випадку коефіцієнту буде присвоєно середнє значення, залежно від обраного виду палива.

Після того як введені всі вихідні дані й обрані всі необхідні параметри, можна виконати розрахунок, натиснувши на кнопку «Розрахунок!». Результати розрахунку можна переглянути, переходячи на вкладки: «Лабораторія», «Тепловий баланс», «Графік нагрівання», «Ескіз поду», «Ескіз печі», «Ескіз поду», натискаючи відповідні кнопки на панелях «Навігація» і «Звіти».

Усі основні параметри винесені на вкладку «Лабораторія». Для переходу на неї необхідно натиснути кнопку «Лабораторія» на панелі навігація, як показано на рис. 18.

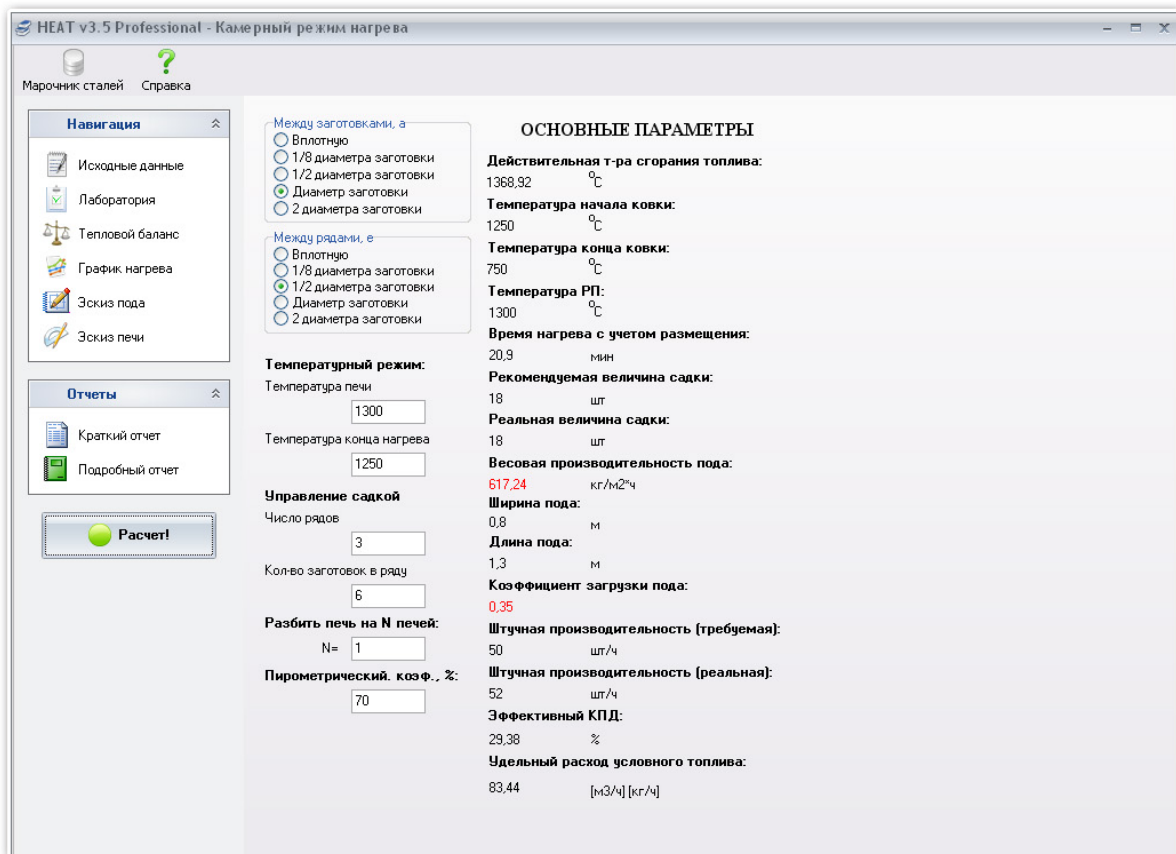


Рисунок 18 – Вкладка «Лабораторія»

Крім перегляду основних розрахункових параметрів, на вкладці «Лабораторія» є можливість керувати розміщенням заготовок на поді печі й вносити зміни в температурний режим нагрівання.

Керування розміщенням заготовок на поді печі здійснюється шляхом зміни відстані між заготовками, відстані між рядами, а також шляхом

зміни кількості рядів і кількості заготовок у ряді. Крім цього, у випадку, якщо піч виходить занадто велика, є можливість розбити її на кілька однакових печей для забезпечення необхідної продуктивності, як показано на рис. 19.

Между заготовками, а

Вплотную

1/8 диаметра заготовки

1/2 диаметра заготовки

Диаметр заготовки

2 диаметра заготовки

Между рядами, е

Вплотную

1/8 диаметра заготовки

1/2 диаметра заготовки

Диаметр заготовки

2 диаметра заготовки

Управление садкой

Число рядов

Кол-во заготовок в ряду

Разбить печь на N печей:

N=

Рисунок 19 – Керування розміщенням заготовок на поду печі

Зміна даних параметрів впливає на розміри печі, продуктивність печі, а так само безпосередньо на час нагрівання заготовок.

Для того що б змінити температурний режим нагрівання, необхідно в полях «Температура печі» і «Температура кінця нагрівання» ввести вибрані параметри, як показано на рис. 20.

Температурный режим:

Температура печи

Температура конца нагрева

Рисунок 20 – Зміна температурного режиму нагрівання

Зміна даних параметрів найбільш суттєво впливає на час нагрівання, а також на інші параметри печі.

Зміна параметрів на вкладці «Лабораторія» дійсна тільки, якщо включено «Лабораторний режим розрахунку» на вкладці «Вихідні дані».

Як було сказано вище, на вкладці «Лабораторія» можна переглядати тільки основні розрахункові параметри. Для перегляду більш повного переліку параметрів необхідно перейти на вкладку «Стислий звіт», натиснувши на кнопку «Стислий звіт», доступну на панелі «Звіти». Дана вкладка подана на рис. 21.

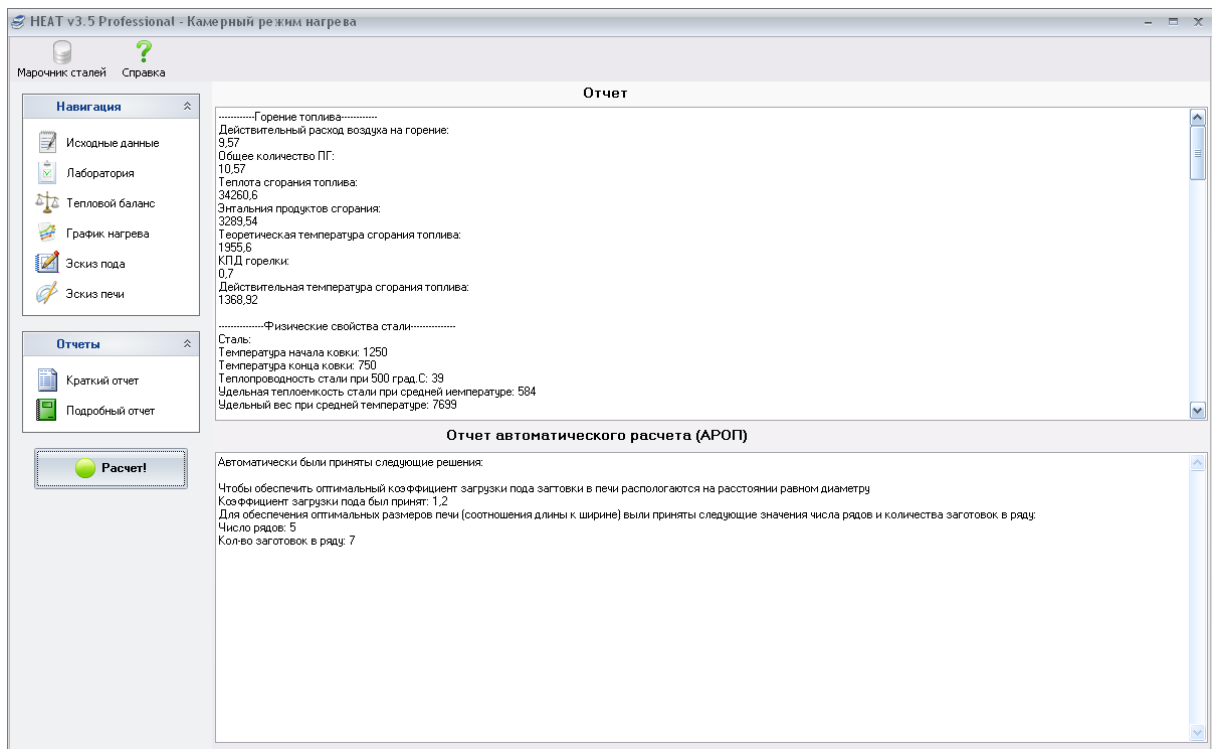


Рисунок 21 – Вкладка «Стислий звіт»

На вкладці «Стислий звіт» є два текстові поля: «Звіт» і «Звіт автоматичного розрахунку (АРОП)». У текстовому полі «Звіт» виводяться всі остаточні результати розрахунку і деякі важливі проміжні значення й коефіцієнти. Звіт, у свою чергу, розбитий на такі розділи: «Горіння палива», «Фізичні властивості сталі», «Час нагрівання», «Визначення розмірів робочого простору печі», «Вибір кладки», «Розміри печі», «Тепловий баланс печі», «Основні техніко-економічні показники».

У текстовому полі «Звіт автоматичного розрахунку (АРОП)» наведені всі розв'язки й значення величин, які були прийняті системою автоматичного розрахунку.

Такі дані, як тепловий баланс, незручні для перегляду в текстовому вигляді, тому спеціально для теплового балансу виділена окрема вкладка, де дані подані в табличному вигляді, як показано на рис. 22. Таке представлення більш наочне й набагато простіше сприймається.

Для того щоб перейти на вкладку «Тепловий баланс», необхідно натиснути кнопку «Тепловий баланс» на навігаційній панелі.

Крім розрахунків числових параметрів, програмний комплекс HEAT v3.5 Professional в автоматичному режимі робить побудову ескізу поду з розміщенням заготовок і ескізу печі з необхідними розмірами.

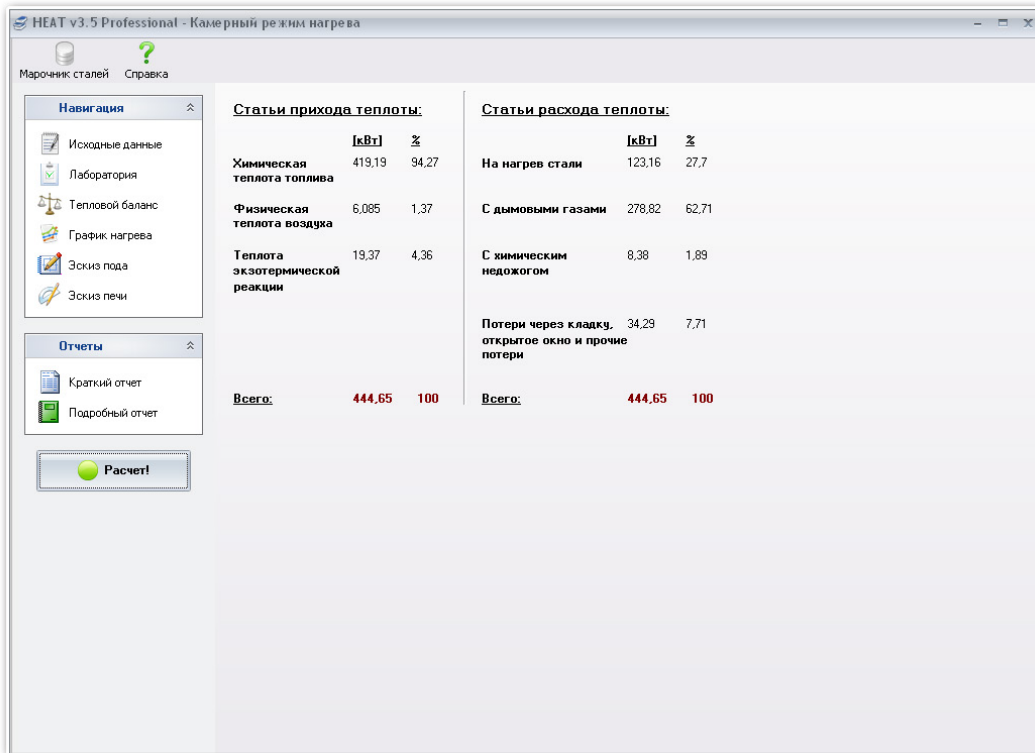


Рисунок 22 – Вкладка параметров для стислого звіту

Для того щоб переглянути створений ескіз поду печі з розміщенням заготовок, необхідно на навігаційній панелі натиснути кнопку «Ескіз поду», після чого з'явиться відповідна вкладка, як показано на рис. 23.

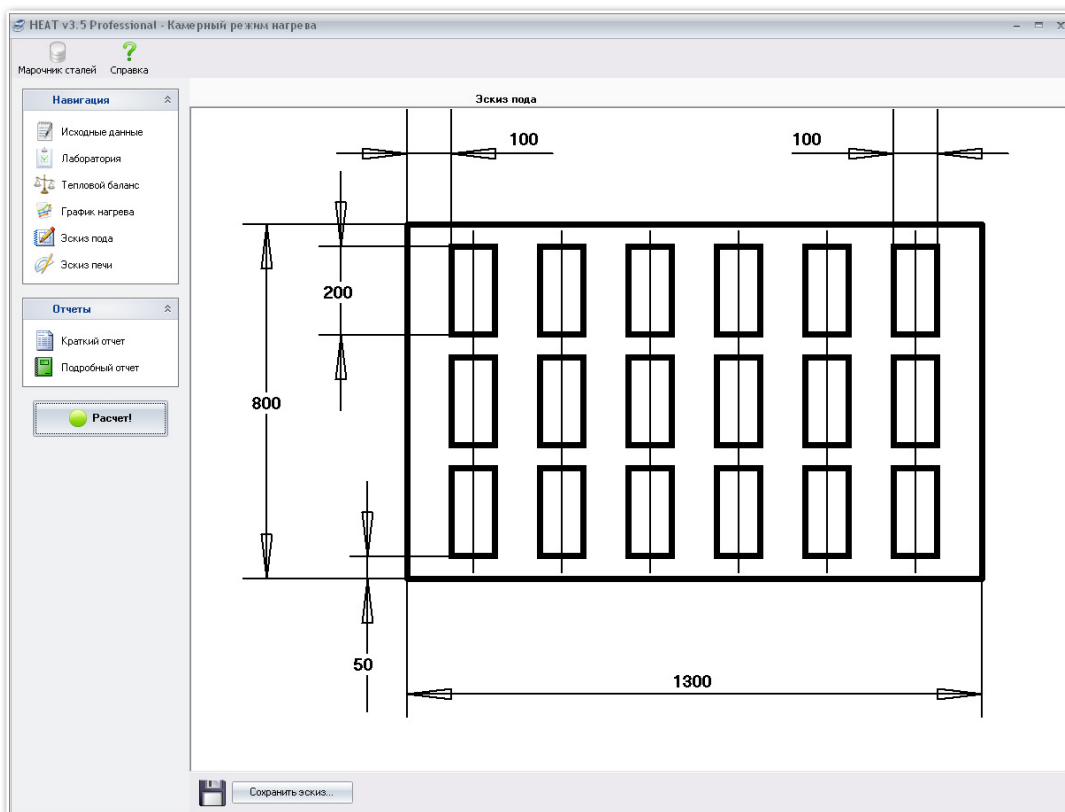


Рисунок 23 – Вкладка «Ескіз поду»

На ескізі представлені такі розміри: довжина поду, ширина поду, діаметр заготовки, довжина заготовки, відстань між заготовками, відстань між рядами заготовок.

Крім того, є можливість зберегти ескіз поду печі у файл, натиснувши на кнопку «Зберегти ескіз...», після чого з'явиться діалогове вікно збереження ескізу в форматі *.jpg.

Для того щоб переглянути створений ескіз печі, необхідно на навігаційній панелі натиснути кнопку «Ескіз печі», після чого з'явиться відповідна вкладка, як показано на рис. 24.

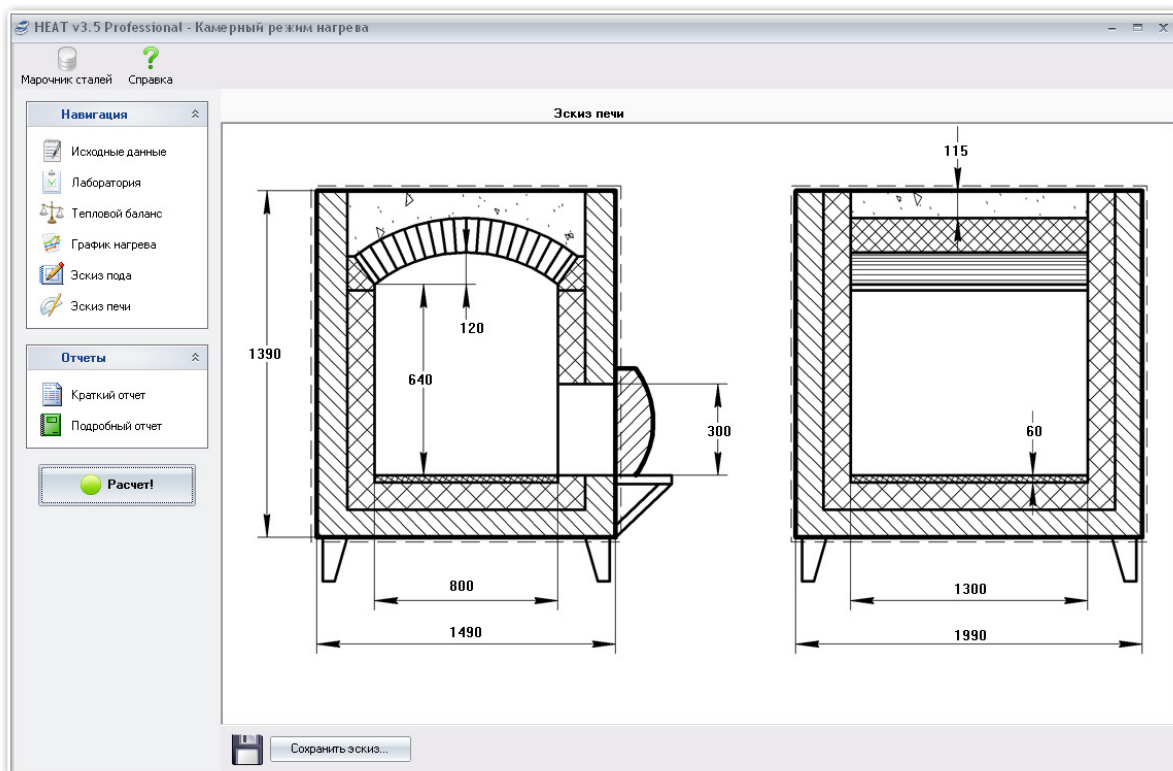


Рисунок 24 – Вкладка «Ескіз печі»

На ескізі показані такі розміри: довжина печі, ширина печі, висота печі, довжина поду, ширина поду, висота вікна завантаження/вивантаження, висота робочого простору печі, висота зводу.

Крім того, є можливість зберегти ескіз печі у файл натиснувши на кнопку «Зберегти ескіз...», після чого з'явиться діалогове вікно збереження ескізу у форматі *.jpg.

У короткому звіті, у розділі «Вибір кладки», є докладний опис усіх шарів кладки (робочий вогнетривкий шар, зовнішній теплоізоляційний шар, под печі) із зазначенням матеріалу й товщини шару.

Для зручності користувача програмний комплекс виконує побудову графіка нагрівання. Для його перегляду необхідно натиснути кнопку «Графік нагрівання» на навігаційній панелі, як показано на рис. 25.

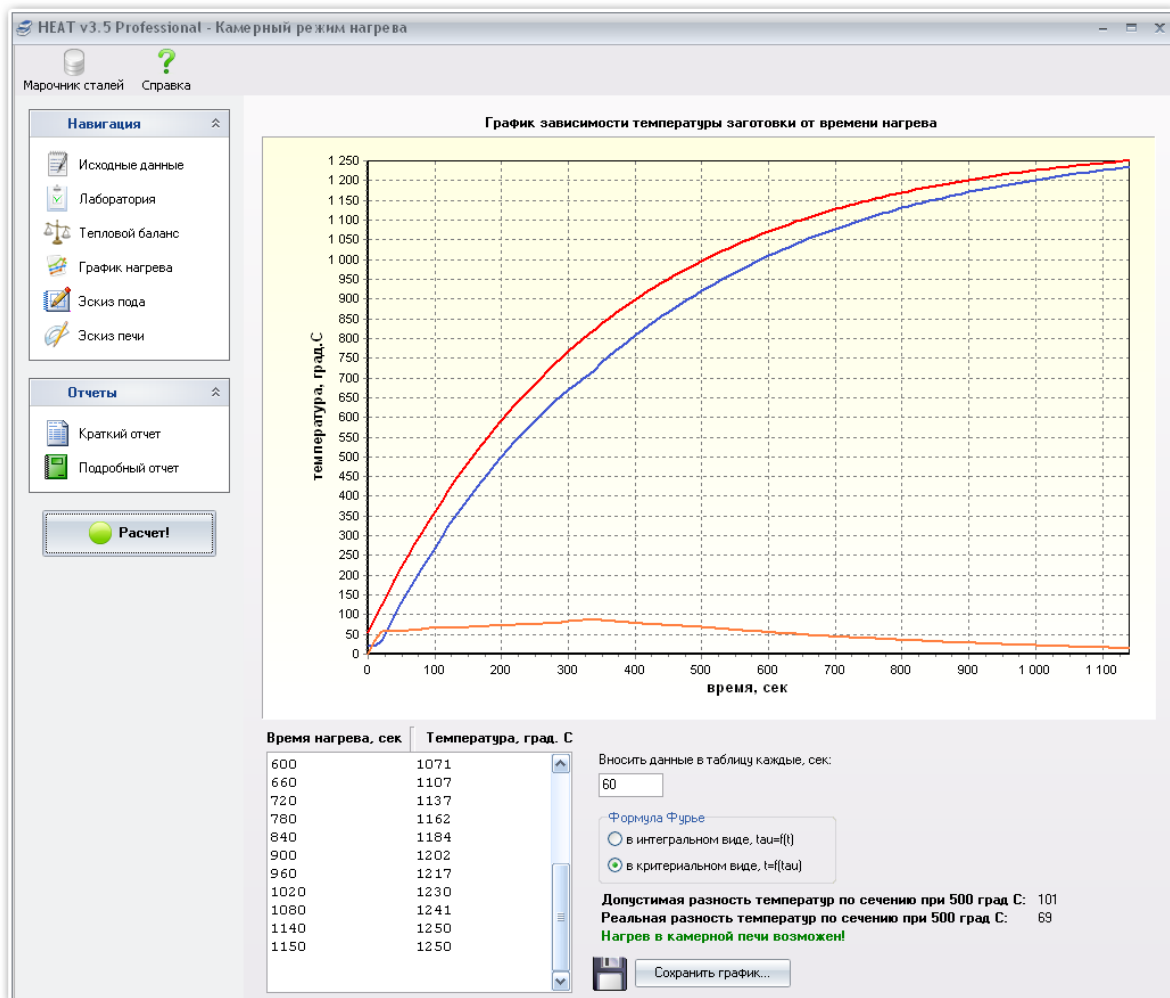


Рисунок 25 – Вкладка «Графік нагрівання»

На вкладці «Графік нагрівання» в одній системі координат подані відразу три графіка:

- 1) температура поверхні заготовки (червоний графік);
- 2) температура осі заготовки (синій графік);
- 3) різниця температур за перерізом заготовки, що нагрівається (жовтогарячий графік).

Крім графіків у табличному вигляді, подана таблиця із двома стовпцями, у яку заносяться дані про час нагрівання й відповідну температуру поверхні заготовки. Дані в таблицю заносяться кожні 60 с нагрівання, але це значення може бути змінено на будь-яке інше, для цього необхідно змінити параметр «Вносити дані в таблицю кожні, сек».

Є можливість збереження графіка нагрівання у файл, натиснувши на кнопку «Зберегти графік...», після чого з'явиться діалогове вікно збереження ескізу у форматі *.jpg.

Програмний комплекс HEAT v3.5 Professional при кожному розрахунку здійснює контроль допустимих термічних напруг, що виникають, на цій підставі робить висновки про можливість нагрівання заданої заготовки в камерній печі, як показано на рис. 26.

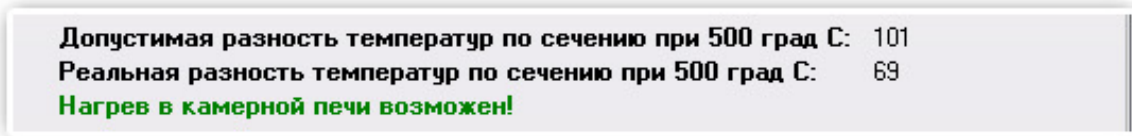


Рисунок 26 – Контроль можливості нагрівання в камерній печі.
Нагрівання допустимо

Програмний комплекс відображає допустиму й реальну різницю температур за перерізом при 500 °С. Якщо ж реальні напруження вищі за допустимі, то нагрівання в камерній печі може призвести до термічних тріщин, браку, якщо нижчі – нагрівання в камерній печі допустимо.

У кожному випадку програмний комплекс видає відповідні попередження, як показано на рис. 26 і 27.

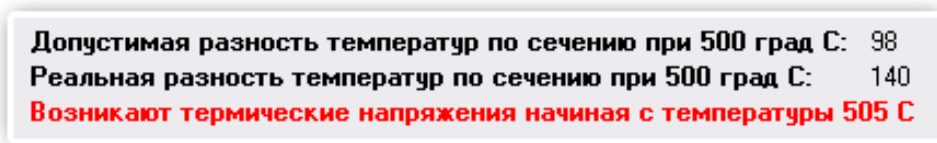


Рисунок 27 –Контроль можливості нагрівання в камерній печі.
Нагрівання не допустимо

Контроль проводиться до температури ~510 °С, тому що цей інтервал є найнебезпечнішим у плані виникнення термічних тріщин. Після ~500 °С метал стає усе більш пластичним і може компенсувати температурні напруження, що виникають.

У тому випадку, якщо нагрівання в камерній печі виявляється неможливим, рекомендується перейти до методичного режиму нагрівання. Такий варіант так само передбачений у програмному комплексі HEAT v3.5 Professional.

3.5. Методичний режим нагрівання

Методичний режим нагрівання – це режим нагрівання заготовок у печі зі змінною температурою робочого простору печі. Методичний режим нагрівання може бути 2-, 3- і 4-зонним.

У програмному комплексі HEAT v3.5 Professional він реалізований не в такому розширеному вигляді, як камерний режим нагрівання, й містить:

- 1) розрахунок режиму нагрівання;
- 2) розрахунок часу нагрівання;
- 3) визначення швидкості нагрівання;
- 4) розрахунок термічних напружень, що виникають у процесі нагрівання;
- 5) розрахунок допустимих напружень.

Для переходу до методичного режиму нагрівання необхідно в головному вікні натиснути на кнопку «Методичний режим нагрівання», як показано на рис. 28.



Рисунок 28 – Кнопка вибору камерного режиму нагрівання

Після переходу до методичного режиму нагрівання з'явиться вікно «HEAT v3.5 Professional – Методичний режим нагрівання», як показано на рис. 29.

Вікно «Методичний режим нагрівання» має структуру, подібну до камерного режиму, і його можна умовно розбити на 4 частини, як показано на рис. 29: панель інструментів, навігаційні кнопки, кнопки звітів і кнопка розрахунку і робоча область.

Роботу з методичним режимом розрахунку необхідно починати з введення вихідних даних, для цього потрібно на навігаційній панелі натиснути кнопку «Вихідні дані», після чого в робочій області з'являться необхідні поля для введення, як показано на рис. 30.

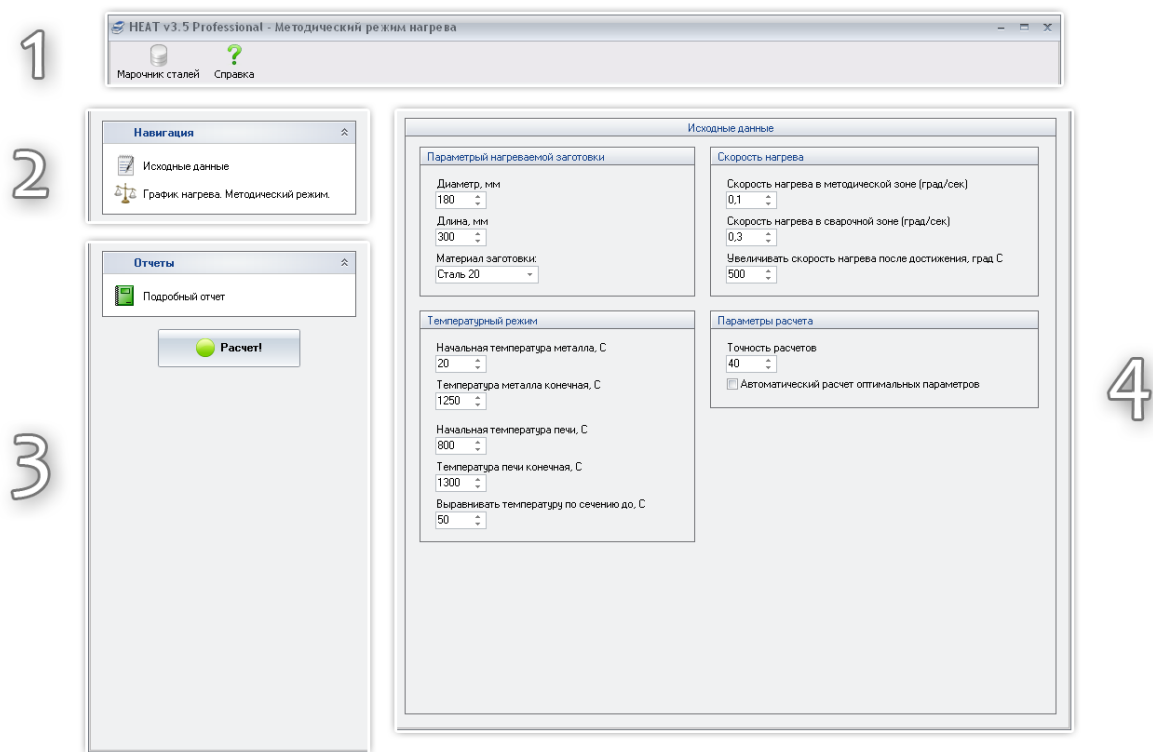


Рисунок 29 – Вікно «HEAT v3.5 Professional – методичний режим нагрівання»:
 1 – панель інструментів; 2 – навігаційні кнопки; 3 – кнопки звітів і кнопка розрахунку;
 4 – робоча область

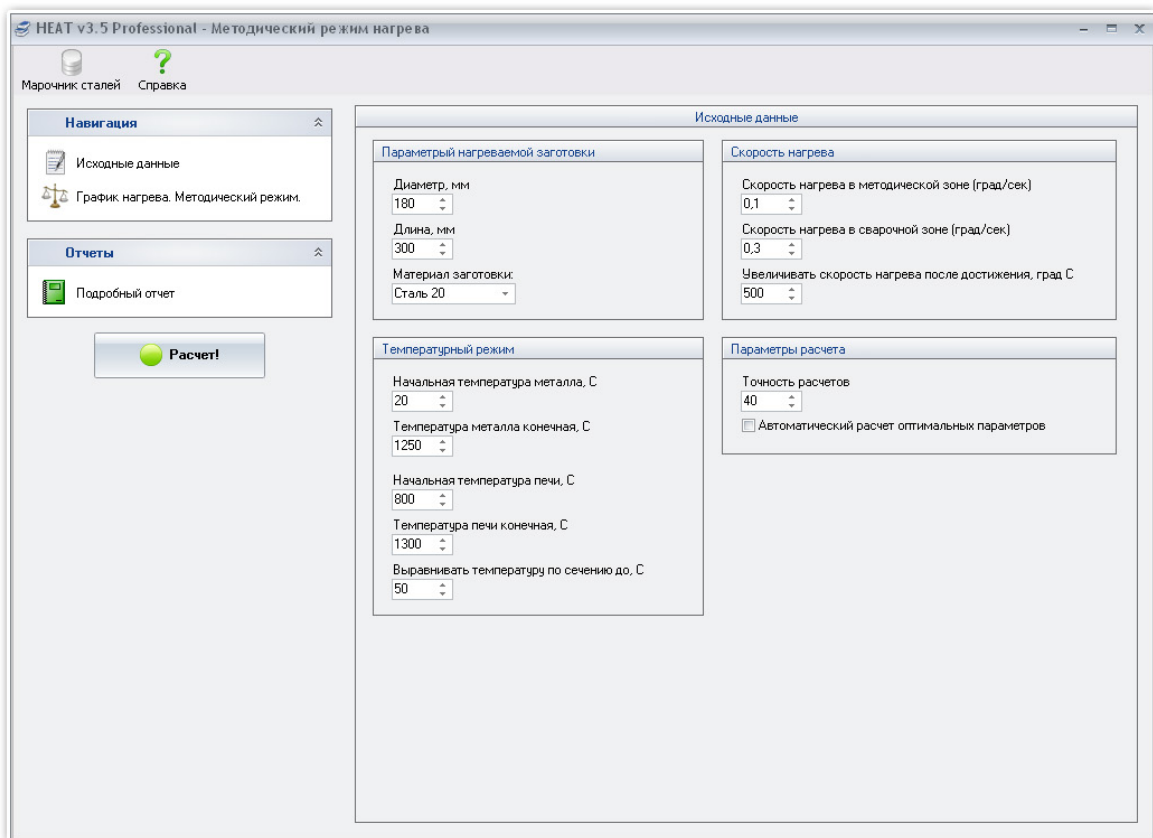


Рисунок 30 – Вкладка «Вихідні дані»

Як вихідні дані необхідно вказати параметри заготовки, що нагрівається: діаметр, довжину й матеріал заготовки, для чого заповнити відповідні поля на панелі «Параметри заготовки, що нагрівається», як показано на рис. 31.

Матеріал заготовки вибирається зі списку сталей, які є в марочнику сталей. Якщо ж потрібного матеріалу немає в списку, завжди є можливість додати будь-який необхідний матеріал, перейшовши в марочник сталей, натиснувши на панелі інструментів кнопку «Марочник сталей».

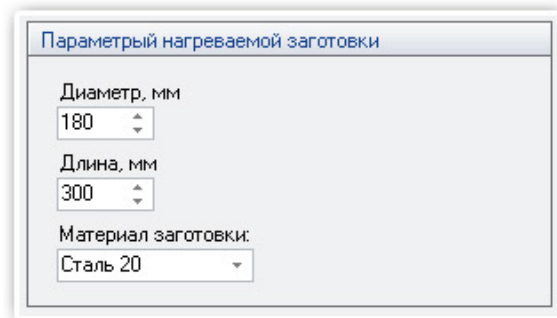


Рисунок 31 – Панель «Параметри заготовки, що нагрівається»

Після того як визначені параметри вихідної заготовки, необхідно перейти до вибору температурного режиму, заповнивши потрібні поля на панелі «Температурний режим», як показано на рис. 32.

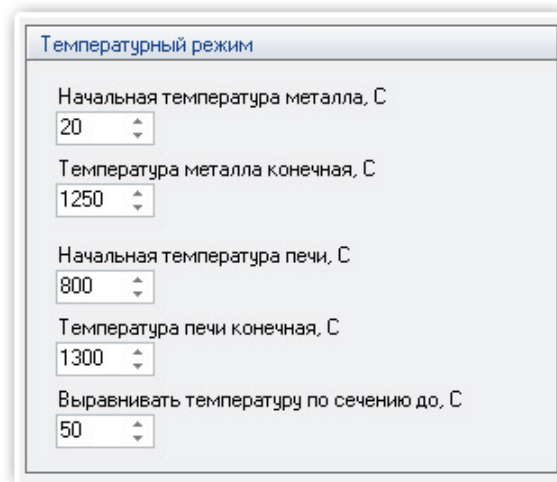


Рисунок 32 – Панель «Температурний режим»

На даній панелі необхідно вказати такі дані: початкову температуру металу, кінцеву температуру металу, початкову температуру печі, кінцеву температуру печі, а також кінцеву різницю температур за перерізом заготовки. Нагрівання буде виконуватися доти, доки не буде досягнута задана кінцева температура нагрівання й задана різниця температур за

перерізом заготовки. Якщо ж задана температура вже досягнута, а різниця температур за перерізом заготовки – ні, у цьому випадку температура печі буде автоматично знижена, і нагрівання буде проводитися доти, доки не буде досягнута необхідна різниця температур за перерізом заготовки.

Варто вказати швидкості нагрівання на панелі «Швидкість нагрівання», як показано на рис. 33.

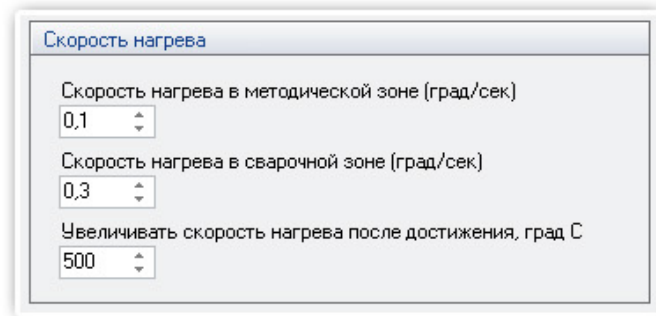


Рисунок 33 – Панель «Швидкість нагрівання»

На даній панелі необхідно вказати швидкість нагрівання в методичній зоні та у зварювальній зоні. Якщо невідомо, які швидкості вказати, то можна підібрати їх експериментальним шляхом, шляхом підстановки різноманітних значень. Так само є можливість визначити оптимальну швидкість нагрівання в автоматичному режимі.

Параметр «Збільшувати швидкість нагрівання після досягнення, град. С» визначає, що після досягнення певної температури здійснювати перехід у зварювальну зону, а отже, і підвищувати швидкість нагрівання заготовки. Як правило, цей параметр беруть рівним 500 °С, тому що до досягнення цієї температури існує підвищена ймовірність виникнення термічних напружень, і отже, нагрівати потрібно з невеликою швидкістю. Після досягнення температури 500 °С пластичність металу підвищується, і ризик появи термічних тріщин із зростанням температури стає дедалі меншим.

Останнім кроком залишається встановлення параметрів розрахунку на панелі «Параметри розрахунку», як показано на рис. 34.

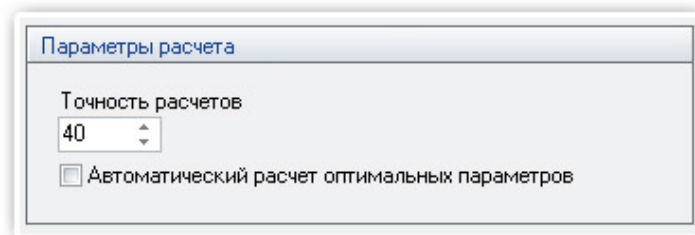


Рисунок 34 – Панель «Параметри розрахунків»

На даній панелі необхідно вказати точність розрахунків. Цей параметр визначає кількість ітерацій, яка буде проводити при побудові графіка. Якщо, наприклад, вказано значення 40, то це означає, що температура заготовки буде розраховуватися кожні 40 с нагрівання й дані будуть заноситися на графік нагрівання. Цей параметр необхідно вибирати, виходячи з розмірів вихідної заготовки за наступним принципом.

Невелика заготовка нагрівається швидко, тому параметр «точність розрахунків» потрібно вказати меншим, що надасть можливість одержати точніший графік. Якщо ж вказати значення «точності розрахунків» занадто великим, то при нагріванні невеликої заготовки графік може мати наближений характер через можливість пропущення деяких ключових точок.

Знову таки, значення «точності розрахунків» не слід вказувати занадто малим, особливо для великих заготовок, тому що в цьому випадку може знадобитися значний час на побудову графіка нагрівання.

Останній параметр – це «Автоматичний розрахунок оптимальних параметрів». Якщо дана опція обрана, то програма автоматично буде підбирати швидкість нагрівання заготовки так, щоб забезпечувався оптимальний час нагрівання, і в той же час різниця температур за перерізом не перевищувала допустиму різницю температур за перерізом на ділянці нагрівання до температури 500 °С. Так само, якщо обрана дана опція, тоді можна не вказувати швидкості нагрівання, заповнюючи вихідні дані.

Якщо опція «Автоматичний розрахунок оптимальних параметрів» не вибрана, тоді в розрахунках будуть використовуватися усі раніше задані параметри.

Після того як введені всі вихідні дані й вибрані всі необхідні опції, можна виконати розрахунок, натиснувши на кнопку «Розрахунок!». Результат розрахунків можна переглянути, перейшовши на вкладку «Графік нагрівання», для цього необхідно натиснути кнопку «Графік нагрівання. Методичний режим» на навігаційній панелі, після чого з'явиться відповідне вікно, як показано на рис. 35.

На вкладці «Графік нагрівання. Методичний режим» в одній системі координат подані відразу п'ять графіків:

- 1) температура поверхні заготовки (червоний графік);
- 2) температура осі заготовки (синій графік);
- 3) різниця температур за перерізом заготовки, що нагрівається (жовтогарячий графік);

- 4) температура маси заготовки (рожевий графік);
- 5) температура робочого простору печі (чорний графік).

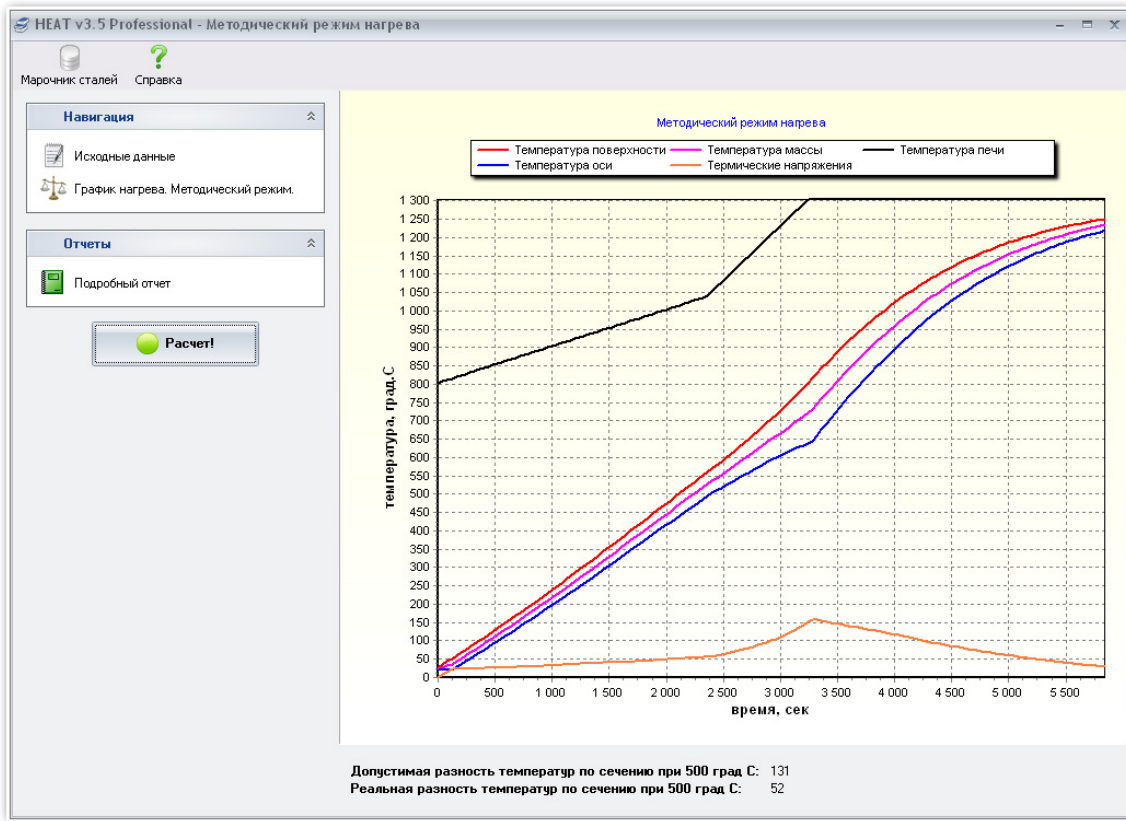


Рисунок 35 – Вкладка «Графік нагрівання. Методичний режим»

Є можливість зберегти графік нагрівання у файл, натиснувши на кнопку «Зберегти графік...», після чого з'явиться діалогове вікно збереження ескізу у форматі *.jpg.

Програмний комплекс HEAT v3.5 Professional при кожному розрахунку робить контроль допустимих термічних напруг, що виникають, як показано на рис. 36.

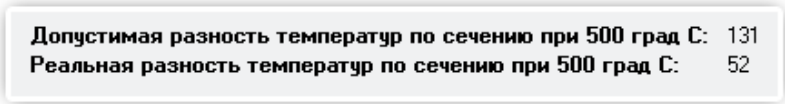


Рисунок 36 – Контроль термічних напруг

Програмний комплекс відображає допустиму й реальну різницю температур за перерізом при 500 °С. Якщо ж реальні напруження вищі, ніж допустимі, то нагрівання може призвести до термічних тріщин, браку, якщо вони нижчі, ніж допустимі, то нагрівання – дозволено.

Контроль проводиться до температури ~510 °С, тому що цей інтервал є найнебезпечнішим у плані виникнення термічних тріщин. Після ~500 °С

метал стає дедалі більш пластичним і може компенсувати температурні напруження, що виникають.

Якщо реальна різниця температур за перерізом набагато менша допустимої, то швидкість нагрівання в методичній зоні можна збільшити. Якщо різниця температур за перерізом більша допустимої, то швидкість нагрівання в методичній зоні необхідно зменшити.

Програмний комплекс HEAT v3.5 Professional дозволяє моделювати найрізноманітніші схеми нагрівання в методичній печі, включаючи 2-, 3- і 4-зонні, як показано на рис. 37, 38, 39.

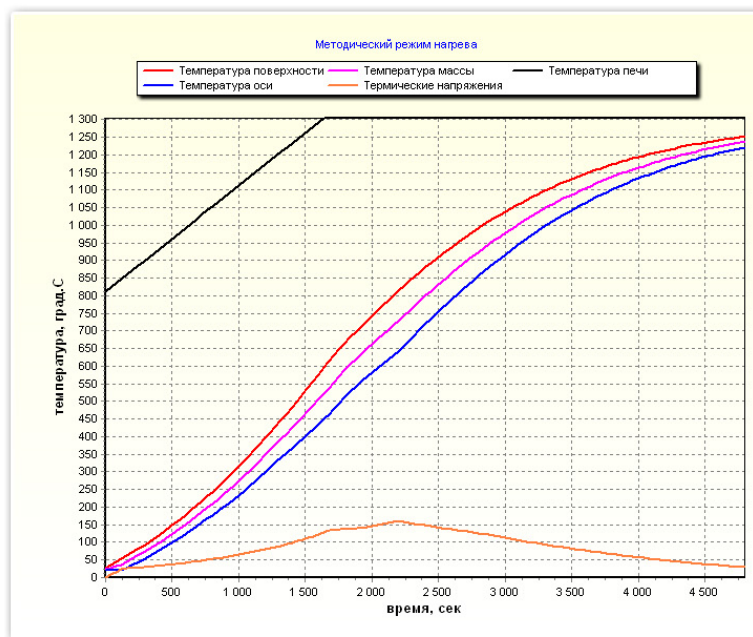


Рисунок 37 – Двоступенчата методична піч

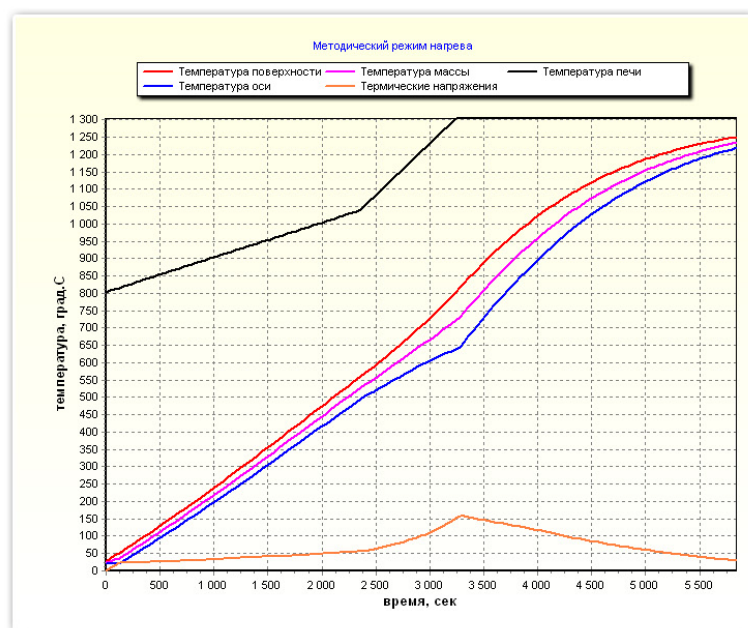


Рисунок 38 – Триступенчата методична піч

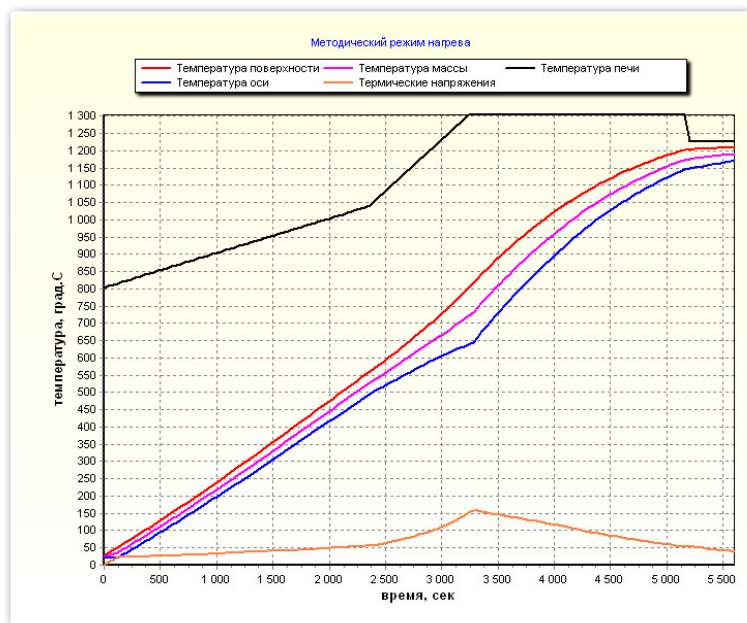


Рисунок 39 – Чотиризонна методична піч

На рис. 39 є четверта зона для вирівнювання температур за перерізом заготовки, про що вже йшлося вище.

3.6. Марочник сталей

У програмному комплексі HEAT v3.5 Professional вбудований марочник сталей. Фактично це база даних, що зберігає в собі всі механічні й фізичні властивості сталей, які необхідні для розрахунків.

Перейти до марочнику сталей можна з будь-якого вікна програми, натиснувши на панелі інструментів кнопку «Марочник сталей», як показано на рис. 40.

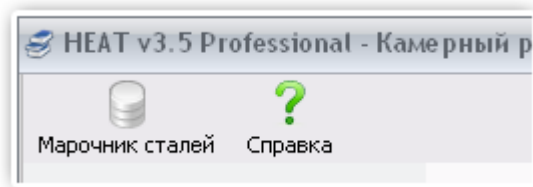


Рисунок 40 – Кнопка «Марочник сталей» на панелі інструментів

Після натискання на дану кнопку з'явиться вікно «HEAT v3.5 Professional – Марочник сталей», як показано на рис. 41.

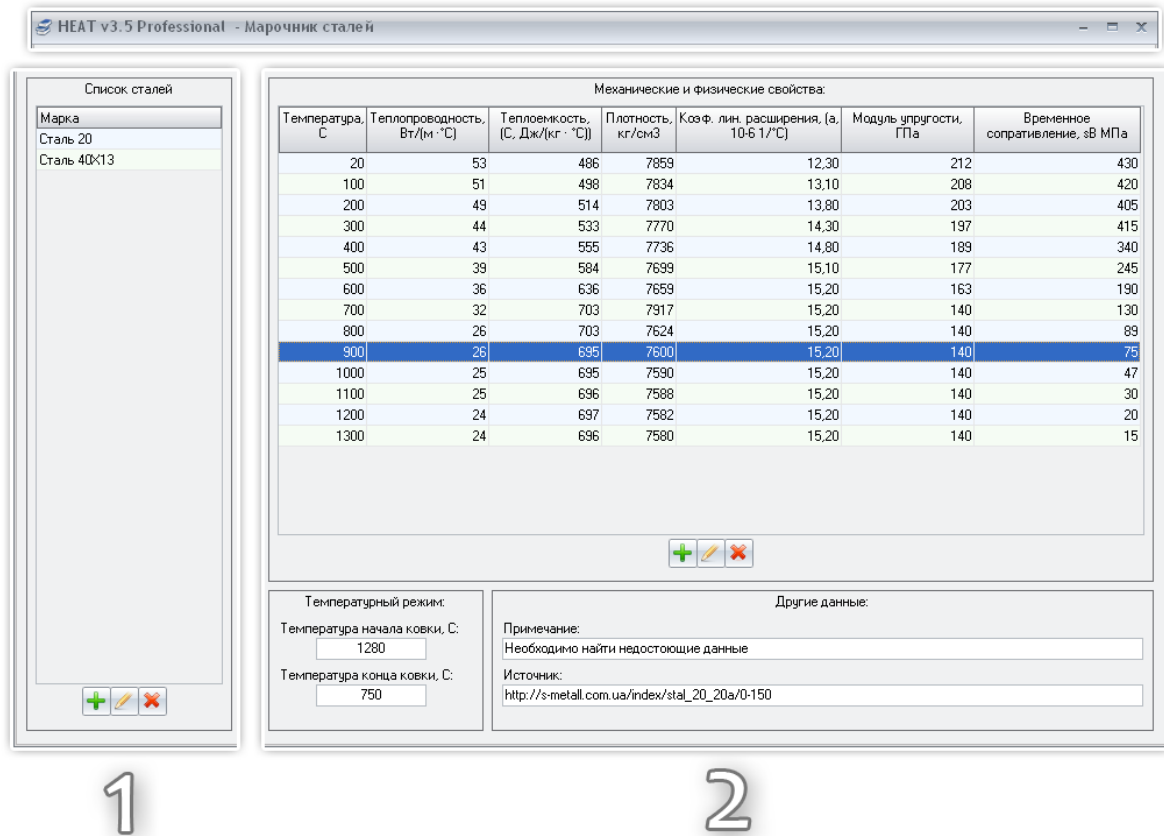


Рисунок 41 – Вікно «Марочник сталей»:
1 – список сталей; 2 – дані про обрану сталь

Дане вікно можна умовно розбити на дві частини: список сталей і дані про обрану сталь.

На кожній із частин є по три функціональні кнопки для додавання, редагування й видалення даних з марочника сталей. У такий спосіб самостійно можна створити свій власний, необхідний набір сталей і користуватися ним при розрахунках.

Крім властивостей сталі, до кожної марки можна приписати невеликий коментар або опис. Це особливо зручно в тому випадку, якщо користувач, написавши будь-яку властивість, не впевнений в її вірогідності й у коментарі може приписати, наприклад «уточнити теплоємність». Також є спеціальне поле, в якому можна вказати джерело даної інформації.

Марочник сталей у цьому вигляді з'явився тільки в HEAT v3.5, на відміну від попередніх версій містить усі теплофізичні параметри, а не усереднені, як це було раніше. Це дозволило ще більше підвищити точність розрахунків.

3.7. Робота з HEAT v3.5 Professional на прикладі

Хоча програмний комплекс досить простий і зрозумілий в освоєнні, одержати прийнятний результат з першого разу не завжди вдається. Незалежно від обраного режиму нагрівання розрахунок проводиться методом послідовного наближення.

Будемо використовувати камерний режим нагрівання й розглянемо роботу програми на прикладі HEAT v2 Professional.

Вихідні дані:

Діаметр заготовки: 80 мм.

Довжина заготовки: 120 мм.

Матеріал: сталь 30Х.

Паливо: мазут зі складом:

$C^r = 87,2 \%$, $H^r = 11,7 \%$, $S^r = 0,5 \%$, $O^r = 0,3 \%$, $N^r = 0,3 \%$, $A^p = 0,1 \%$, $W^p = 2 \%$.

Температура повітря: $t_b = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = 1,2$.

Продуктивність печі: 100 шт/год.

Вводимо вихідні дані, як показано на рис. 42.

The screenshot shows the software interface with two main sections: 'Состав топлива' (Fuel composition) and 'Размеры заготовки' (Workpiece dimensions). The fuel composition section is set to 'Жидкое топливо' (Liquid fuel) and lists chemical elements with their percentages: C (Г) 87.2, H (Г) 11.7, S (Г) 0.5, O2 (Г) 0.3, N2 (Г) 0.3, Summa 100, A (P) 0.1, and W (P) 2. The air excess coefficient is set to 1.2 and the air temperature to 300. The workpiece dimensions section shows a diameter of 80 mm, length of 120 mm, and productivity of 100 units/year. The material is set to 'Сталь 30Х'. The calculation mode is set to 'Автоматический расчет' (Automatic calculation). The radiation coefficient calculation is checked, and the resulting value is 3.05.

Рисунок 42 – Уведення вихідних даних

Для початку виберемо автоматичний режим розрахунку і включимо

розрахунок коефіцієнта $C_{г.к.м.}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, для підвищення точності розрахунку.

Після цього натискаємо кнопку «Розрахунок!».

При автоматичному розрахунку одержуємо результат, як показано на рис. 43.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	
Действительная t-ра сгорания топлива:	1304,5 °C
Температура начала ковки:	1250 °C
Температура конца ковки:	800 °C
Температура РП:	1300 °C
Время нагрева с учетом размещения:	18,51 мин
Рекомендуемая величина садки:	31 шт
Реальная величина садки:	35 шт
Весовая производительность пода:	533,46 кг/м ² ·ч
Ширина пода:	0,84 м
Длина пода:	1,2 м
Коэффициент загрузки пода:	0,33
Штучная производительность (требуемая):	100 шт/ч
Штучная производительность (реальная):	114 шт/ч
Эффективный КПД:	33,33 %
Удельный расход условного топлива:	85,4 [м ³ /ч] [кг/ч]

Рисунок 43 – Результат автоматичного розрахунків

Час нагрівання становить 18,51 хв. Реальне значення садки в цьому випадку на 4 заготовки більше необхідного, а отже, і штучна продуктивність буде не 100 шт/год, а 114 шт/год. Отримана вагова продуктивність, ширина й довжина поду – в межах норми. Коефіцієнт завантаження поду дорівнює 0,33 (33 %), що є досить низьким показником. Програма виділяє його, як і будь-який інший параметр, що виходить за допустимі межі, червоним кольором і при наведенні курсору з'явиться контекстна підказка, як показано на рис. 44.

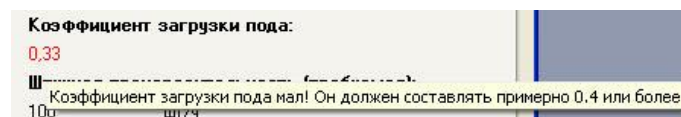


Рисунок 44 – Контекстна підказка при наведенні курсору

Автоматично був отриманий досить непоганий результат, але для досягнення кращого результату перейдемо в «Лабораторний режим розрахунку» і спробуємо добитися кращого результату вручну.

Вибираємо «Лабораторний режим розрахунку», як показано на рис. 45).

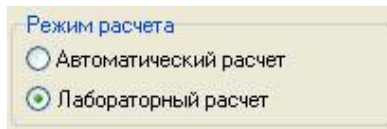


Рисунок 45 – Меню вибору режиму розрахунку

Через необхідність збільшити коефіцієнт завантаження поду переходимо на вкладку «Лабораторія» і зменшуємо відстань між заготовками з діаметра заготовки на $\frac{1}{2}$ діаметра заготовки. Натискаємо кнопку розрахунку. Одержуємо результати, як показано на рис. 46.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	
<p>Между заготовками, а</p> <p><input type="radio"/> Вплотную</p> <p><input type="radio"/> 1/8 диаметра заготовки</p> <p><input checked="" type="radio"/> 1/2 диаметра заготовки</p> <p><input type="radio"/> Диаметр заготовки</p> <p><input type="radio"/> 2 диаметра заготовки</p>	<p>Действительная т-ра сгорания топлива:</p> <p>1304,5 °C</p>
<p>Между рядами, е</p> <p><input type="radio"/> Вплотную</p> <p><input type="radio"/> 1/8 диаметра заготовки</p> <p><input checked="" type="radio"/> 1/2 диаметра заготовки</p> <p><input type="radio"/> Диаметр заготовки</p> <p><input type="radio"/> 2 диаметра заготовки</p>	<p>Температура начала ковки:</p> <p>1250 °C</p>
<p>Температурный режим:</p> <p>Температура печи</p> <p><input type="text" value="1300"/></p>	<p>Температура конца ковки:</p> <p>800 °C</p>
<p>Температура конца нагрева</p> <p><input type="text" value="1250"/></p>	<p>Температура РП:</p> <p>1300 °C</p>
<p>Управление садкой</p> <p>Число рядов</p> <p><input type="text" value="5"/></p>	<p>Время нагрева с учетом размещения:</p> <p>21,46 мин</p>
<p>Кол-во заготовок в ряду</p> <p><input type="text" value="7"/></p>	<p>Рекомендуемая величина садки:</p> <p>36 шт</p>
<p>Разбить печь на N печей:</p> <p>N = <input type="text" value="1"/></p>	<p>Реальная величина садки:</p> <p>35 шт</p>
<p>КПД горелки, %:</p> <p><input type="text" value="65"/></p>	<p>Весовая производительность пода:</p> <p>625,35 кг/м²ч</p>
<p><input type="button" value="Компановка пода..."/></p> <p><input type="button" value="Эскиз печи..."/></p>	<p>Ширина пода:</p> <p>0,84 м</p>
	<p>Длина пода:</p> <p>0,88 м</p>
	<p>Кoeffициент загрузки пода:</p> <p>0,45</p>
	<p>Штучная производительность (требуемая):</p> <p>100 шт/ч</p>
	<p>Штучная производительность (реальная):</p> <p>98 шт/ч</p>
	<p>Эффективный КПД:</p> <p>34,18 %</p>
	<p>Удельный расход условного топлива:</p> <p>83,27 [м3/ч] [кг/ч]</p>

Рисунок 46 – Результат розрахунків

Коефіцієнт завантаження поду підвищився до 45 %, але вагова продуктивність поду занадто велика й не забезпечується нормальне (2/3) співвідношення довжини до ширини печі й продуктивність печі. Але в цьому немає нічого страшного, адже зміна відстані між заготовками фактично змінила час нагрівання, а отже, і величина садки. Тепер необхідно підібрати число рядів і число заготовок у ряді. Вибираємо 4 ряди по 10 заготовок у ряді, натискаємо кнопку «Розрахунок!». Одержуємо результат, як показано на рис. 47.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	
<p>Между заготовками, а</p> <p><input type="radio"/> Вплотную</p> <p><input type="radio"/> 1/8 диаметра заготовки</p> <p><input checked="" type="radio"/> 1/2 диаметра заготовки</p> <p><input type="radio"/> Диаметр заготовки</p> <p><input type="radio"/> 2 диаметра заготовки</p>	<p>Действительная т-ра сгорания топлива:</p> <p>1304,5 °C</p>
<p>Между рядами, е</p> <p><input type="radio"/> Вплотную</p> <p><input type="radio"/> 1/8 диаметра заготовки</p> <p><input checked="" type="radio"/> 1/2 диаметра заготовки</p> <p><input type="radio"/> Диаметр заготовки</p> <p><input type="radio"/> 2 диаметра заготовки</p>	<p>Температура начала ковки:</p> <p>1250 °C</p>
<p>Температурный режим:</p> <p>Температура печи</p> <p><input type="text" value="1300"/></p>	<p>Температура конца ковки:</p> <p>800 °C</p>
<p>Температура конца нагрева</p> <p><input type="text" value="1250"/></p>	<p>Температура РП:</p> <p>1300 °C</p>
<p>Управление садкой</p> <p>Число рядов</p> <p><input type="text" value="4"/></p>	<p>Время нагрева с учетом размещения:</p> <p>22,49 мин</p>
<p>Кол-во заготовок в ряду</p> <p><input type="text" value="10"/></p>	<p>Рекомендуемая величина садки:</p> <p>38 шт</p>
<p>Разбить печь на N печей:</p> <p>N= <input type="text" value="1"/></p>	<p>Реальная величина садки:</p> <p>40 шт</p>
<p>КПД горелки, %:</p> <p><input type="text" value="65"/></p>	<p>Весовая производительность пода:</p> <p>598,56 кг/м²ч</p>
<p><input type="button" value="Компановка пода..."/></p>	<p>Ширина пода:</p> <p>0,68 м</p>
<p><input type="button" value="Эскиз печи..."/></p>	<p>Длина пода:</p> <p>1,24 м</p>
	<p>Коэффициент загрузки пода:</p> <p>0,46</p>
	<p>Штучная производительность (требуемая):</p> <p>100 шт/ч</p>
	<p>Штучная производительность (реальная):</p> <p>107 шт/ч</p>
	<p>Эффективный КПД:</p> <p>34,24 %</p>
	<p>Удельный расход условного топлива:</p> <p>83,13 [мЗ/ч] [кг/ч]</p>

Рисунок 47 – Результат розрахунків

Після корегування усіх параметрів в межах норми коефіцієнт завантаження поду збільшився до 46 %. Оптимізовано розмір садки. Піч стала більш компактною. Найімовірніше, можна було б одержати й кращий результат, але оскільки цей результат забезпечує достатній ступінь точності, то зупинимося на ньому.

Примітки:

1. Одержати прийнятний результат вдається далеко не завжди. Програма побудована таким чином, що до бажаного результату потрібно наблизитися послідовно, змінюючи ті або інші параметри. Це дозволяє проводити розрахунок в режимі «Лабораторія», яка побудована так, щоб усі головні параметри й показники роботи печі перебували перед очима користувача, і якщо який-небудь із параметрів виходить за межі норми, програма сповіщає про це, виділяючи його червоним кольором. При наведенні курсору на такий параметр з'являється підказка з поясненням, чому цей параметр було виділено.

2. Можна помітити, що при зміні будь-якого параметра відразу ж змінюється час нагрівання заготовки. Це пов'язано зі зміною умов нагрівання, які залежать від розміщення заготовок і їх розмірів, складу палива й розмірів робочого простору печі.

3.8. Збереження результатів

У вікні програми можна переглянути тільки основні параметри печі й короткий звіт. Тому передбачена можливість створити повний звіт, що включає в себе результати всіх розрахунків, ескізи печі й поду. Для того щоб створити повний звіт переконайтеся в тому, що на вашому ПК встановлений MS Office Word. Якщо він відкритий, то рекомендується закрити його. Потім поставте галочку «Створити докладний звіт» і натиснути кнопку «Указати», як показано на рис. 48.

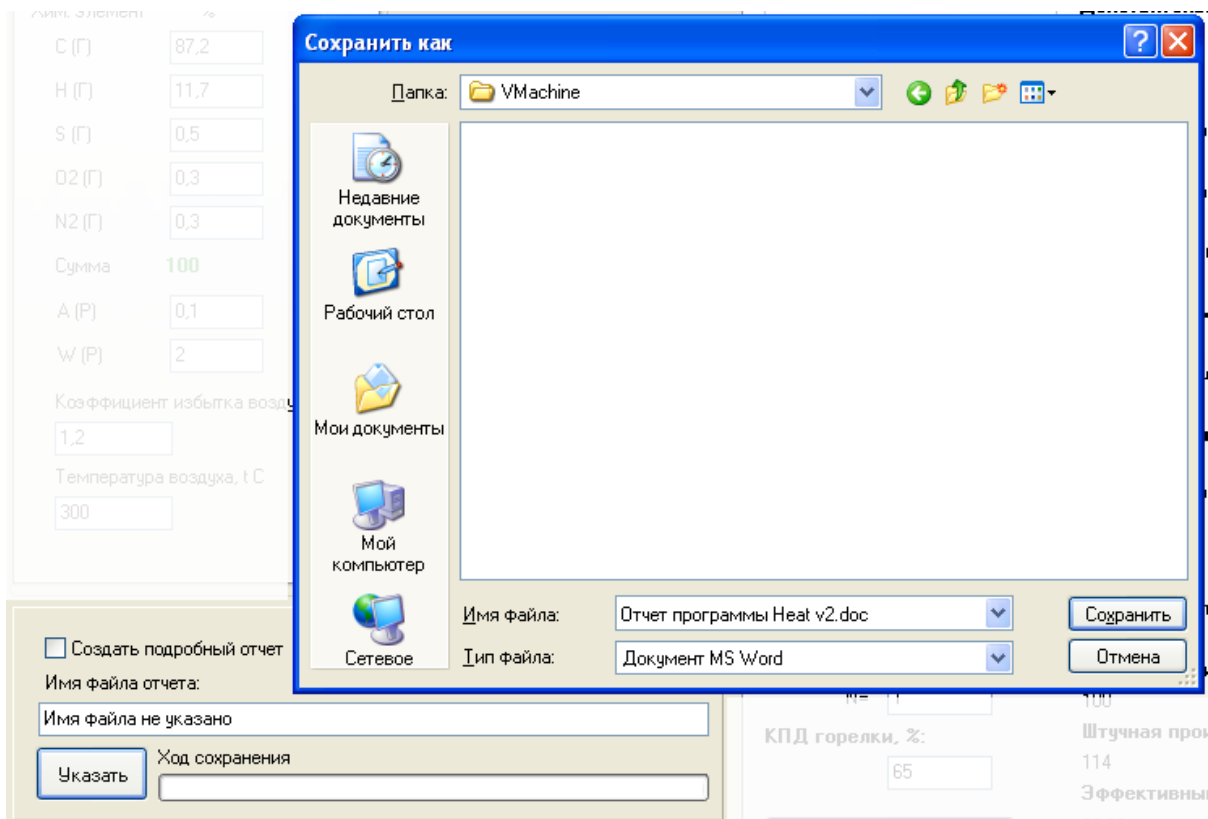


Рисунок 48 – Збереження файлу

Після цього з'явиться стандартне діалогове вікно збереження файлу. Вибираємо шлях збереження звіту і натискаємо кнопку «Зберегти». Не міняючи ніяких параметрів, натискаємо кнопку «Розрахунок!» і чекаємо, доки не буде завершено створення звіту. Це може зайняти від 30 до 60 секунд. Під час збереження показується хід збереження й поточна операція.

Крім повного звіту, ви можете переглянути й зберегти у файл ескіз печі, ескіз поду й графік нагрівання.

Примітка до збереження.

Якщо операційна система як десятковий роздільник використовує крапку ".", то можуть виникнути проблеми в роботі з MS Office Word, це пов'язано з особливістю офісного пакета. Рекомендується вибрати як десятковий роздільник кому ",". Для цього необхідно зайти в «ПУСК» – «Панель керування» – «Мова й регіональні стандарти», вкладка «Регіональні параметри» – натиснути кнопку «Настроювання...», у вікні, що з'явилося, змінити «роздільник цілої й дробової частини» із крапки на кому.

3.9. Робота з вихідними даними

Дуже часто виникає ситуація, коли необхідно перерватися й продовжити роботу наступного разу. **HEAT v2 Professional** надає таку можливість. Користувач може легко й швидко зберегти, а потім знову завантажити вихідні дані й параметри лабораторії для продовження роботи.

Зайдіть у головне меню, «Файл» – «Зберегти дані Heat», як показано на рис. 49.

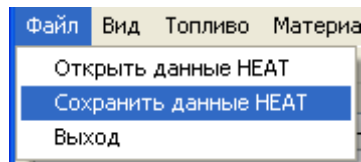


Рисунок 49 – Головне меню «Файл»

Після цього з'явиться стандартне діалогове вікно Windows для збереження файлу.

Аналогічно відбувається завантаження.

3.10. Редактор властивостей сталей

Кількість марок сталей у вбудованій базі даних досить обмежена, тому був розроблений «Редактор властивостей сталей», який дозволяє:

- переглядати властивості сталей у базі даних (БД);
- вносити зміни в БД;
- додавати нові марки сталей;
- видаляти марки сталей з БД;

- додавати коментарі або описи до марок сталей;
- відновляти базу даних.

Для того щоб увійти в редактор властивостей сталей, потрібно натиснути в головному вікні кнопку «Змінити/додати» або в головному меню вибрати «Матеріал» → «Редактор властивостей сталей...». З'явиться вікно редактора властивостей, як показано на рис. 50.

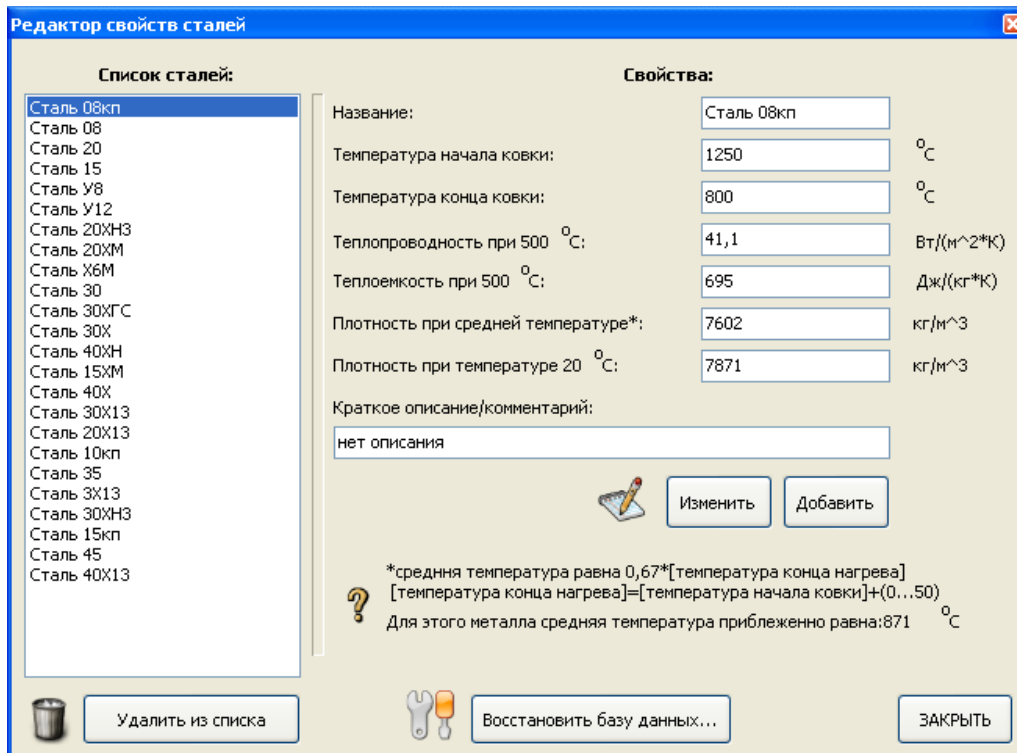


Рисунок 50 – Редактор властивостей сталей

Для того щоб переглянути властивості сталі, необхідно просто вибрати марку зі списку.

Для редагування властивостей сталі необхідно вибрати її зі списку, увести нові значення й натиснути кнопку «Змінити».

Щоб додати марку сталі, необхідно ввести назву сталі й усі необхідні властивості у відповідні поля й натиснути кнопку «Додати», якщо ж марка сталі з такою назвою уже є, то з'явиться відповідне попередження.

Для видалення марки сталі зі списку необхідно вибрати потрібну сталь і натиснути кнопку «Вилучити зі списку»

Якщо база даних була пошкоджена, то в будь-який момент можна її відновити, натиснувши на кнопку «Відновити базу даних...». При цьому поточна база даних буде замінена стандартною.

***Примітка.** Крім властивостей сталі, до кожної марки можна приписати невеликий коментар або опис. Це особливо зручно в тому випадку, якщо користувач, написавши яку-небудь властивість, не впевнений в її вірогідності й у коментарі може приписати, наприклад «уточнити теплоємність».*

Контрольні запитання

1. Спосіб визначення часу нагрівання.
2. Загальна характеристика програмного комплексу HEAT v3.5 Professional.
3. Опишіть модулі програмного комплексу HEAT v3.5 Professional.
4. Опишіть загальний алгоритм роботи програмного комплексу HEAT v3.5 Professional.
5. Опишіть структуру програмного комплексу HEAT v3.5 Professional.
6. Початок роботи з програмним комплексом HEAT v3.5 Professional.
7. Камерний режим нагрівання.
8. Методичний режим нагрівання.
9. Робота з марочником сталей.
10. Збереження результатів розрахунку.
11. Робота з вихідними даними.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Телегин А. С. Теплотехника и нагревательные устройства : учеб. пособие для машиностроительных техникумов по специальности «Ковочно-штамповочное производство» / А. С. Телегин, В. Г. Авдеева. – Москва : Машиностроение, 1985. – 249 с.
2. Скворцов А. А. Нагревательные устройства / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, М. А. Кузелев. – Москва : Высшая школа, 1965. – 443 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-ч т. / Ред. совет: Е. И. Семенов и др. – Москва : Машиностроение, 1985. – Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е. И. Семенова, 1985. – 568 с.
4. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчета и проектирования / Е. И. Казанцев. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 367 с.
5. Аверин С. И. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов. – Киев : Техника, 1969. – 502 с.
6. Касенков М. А. Нагревательные устройства кузнечного производства / М. А. Касенков. – Москва : Mashizd. – 1962. – 471 с.
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей / под ред. А. С. Телегина. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 528 с.
8. Ковка и штамповка : Справочник. Т.2. Горячая штамповка / под ред. Е. И. Семенова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 592 с.
9. Кривандин В. А. Металлургические печи / В. А. Кривандин , Б. Л. Марков. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 216 с.
10. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е издание, дополненное и переработанное / Е. И. Казанцев. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 368 с.
11. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. – М. : Metallurgiya, 1964. – 451 с.
12. Телегин А. С. Теплотехника и нагревательные устройства: Учеб. пособие для машиностроительных техникумов по специальности: «Ковочно-штамповочное производство» / А. С. Телегин, В. Г. Авдеева. – Москва : Машиностроение, 1985. – 248 с.
13. Филиппев О. В. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов / О. В. Филиппев. – Москва : Metallurgiya, 1972. – 240 с.

14. Зайцев Ю. С. Промышленные печи / Ю. С. Зайцев, О. В. Филиппев. – Харьков, 1998. – 548 с.

15. Телегин А. С. Конструкции и расчет нагревательных устройств : учебник для машиностроительных техникумов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. / А. С. Телегин, Н. С. Лебедев. – Москва : Машиностроение, 1975. – 280 с.

16. Скворцов А. А. Нагревательные устройства / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, М. Я. Кузелов. – Москва : Высшая школа, 1965. – 443 с.

17. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчета и проектирования / Е. И. Казанцев. – Москва : Metallurgia, 1975. – 367 с.

18. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 368 с.

19. Сорокина С. И. Программирование драйверов и систем безопасности : учеб. пособие / С. И. Сорокина, А. Ю. Тихонов, А. Ю. Щербанов. – Санкт-Петербург : БХВ – Петербург, Москва : Издательство Молгачева С. В., 2002. – 256 с.

20. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 7 / А. Я. Архангельский. – Москва : ООО «Бином-Пресс», 2005. – 1152 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Питома вага деяких сталей

Марка сталі	Питома вага при середній температурі	Питома вага при температурі 20 °С
	$\rho_{\text{сер}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Сталь 08кп	7602	7871
Сталь 08	7602	7871
Сталь 20	7600	7859
Сталь 15	7584	7850
Сталь В8	7852	7839
Сталь В12	7565	7830
Сталь 20ХН3	7597	7850
Сталь 20ХМ	7622	7850
Сталь Х6М	7605	7750
Сталь 30	7549	7850
Сталь 30ХГС	7584	7850
Сталь 30Х	7506	7820
Сталь 40ХН	7516	7820
Сталь 15ХМ	7622	7850
Сталь 40Х	7650	7850
Сталь 30Х13	7460	7670
Сталь 20Х13	7450	7670
Сталь 10кп	7594	7856
Сталь 35	7549	7826
Сталь 3Х13	7442	7648
Сталь 30ХН3	7600	7850
Сталь 15кп	7584	7850

Додаток 2

Середня питома теплоємність деяких сталей

Марка сталі	Середня питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Сталь 08кп	695
Сталь 08	695
Сталь 20	695
Сталь 15	708
Сталь В8	703
Сталь В12	699
Сталь 20ХН3	703
Сталь 20ХМ	688
Сталь Х6М	699
Сталь 30	699
Сталь 30ХГС	693
Сталь 30Х	678
Сталь 40ХН	680
Сталь 15ХМ	688
Сталь 40Х	684
Сталь 30Х13	682
Сталь 20Х13	659
Сталь 10кп	687
Сталь 35	699
Сталь 3Х13	691
Сталь 30ХН3	687
Сталь 15кп	708

Додаток 3

Варіанти завдань

№ варіанта	Паливо				Розміри заготовки			Продуктивність, $N, \frac{\text{шт}}{\text{год}}$
	Вид	Склад, %	Повітря $t, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Матеріал	Діаметр, мм	Довжина, мм	
1	Природний газ	$\text{CH}_4 = 94,4$ $\text{C}_2 = 0,6$ $\text{N}_2 = 5$	20	1,05	Сталь 08кп	45	140	220
2	Природний газ	$\text{CH}_4 = 85,0$ $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8$ $\text{C}_4\text{H}_{10} = 1,2$ $\text{C}_2 = 11$	300	1,05	Сталь 08	65	130	120
3	Природний газ	$\text{CH}_4 = 86,0$ $\text{C}_2\text{H}_6 = 3$ $\text{C}_4\text{H}_{10} = 1$ $\text{C}_2 = 10$	300	1,05	Сталь 08	65	130	120
4	Природний газ	$\text{CH}_4 = 75,7$ $\text{C}_2\text{H}_6 = 21,3$ $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,4$ $\text{C}_4\text{H}_{10} = 1,6$	300	1,04	Сталь 20	75	150	100
5	Мазут 80	$\text{C}^\Gamma = 87,6$ $\text{H}^\Gamma = 10,6$ $\text{S}^\Gamma = 0,8$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 1$ $\text{A}^P = 0,2$ $\text{W}^P = 5$	300	1,25	Сталь 15	85	115	80
6	Мазут сірчистий	$\text{C}^\Gamma = 85$ $\text{H}^\Gamma = 11,8$ $\text{S}^\Gamma = 2,3$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 0,9$ $\text{A}^P = 0,15$ $\text{W}^P = 2$	250	1,22	Сталь В8	105	120	90
7	Смола кам'яно-вугільна	$\text{C}^\Gamma = 90$ $\text{H}^\Gamma = 7$ $\text{S}^\Gamma = 1$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 2$ $\text{A}^P = 1$ $\text{W}^P = 5$	300	1,2	Сталь В12	95	150	110
8	Смола буровугільна	$\text{C}^\Gamma = 83$ $\text{H}^\Gamma = 7$ $\text{S}^\Gamma = 2$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 8$ $\text{A}^P = 1$ $\text{W}^P = 5$	20	1,24	Сталь 20ХН3	75	100	150
9	Природний газ	$\text{CH}_4 = 95,7$ $\text{C}_2 = 0,1$ $\text{N}_2 = 4,2$	300	1,05	Сталь 20ХМ	95	110	110
10	Газоподібне	$\text{CH}_4 = 60$ $\text{N}_2 = 40$	20	1,05	Сталь Х6М	40	300	120

Продовження додатка 3

№ варіанта	Паливо				Розміри заготовки			Продуктивність, $N, \frac{\text{шт}}{\text{год}}$
	Вид	Склад, %	Повітря $t, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Матеріал	Діаметр, мм	Довжина, мм	
11	Природний газ	$\text{CH}_4 = 88,0$ $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2$ $\text{C}_2 = 0,1$ $\text{N}_2 = 11,7$	300	1,05	Сталь 20	120	250	120
12	Мазут	$\text{C}^\Gamma = 87,2$ $\text{H}^\Gamma = 11,7$ $\text{S}^\Gamma = 0,5$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 0,6$ $\text{A}^\text{P} = 0,1$ $\text{W}^\text{P} = 2$	250	1,2	Сталь 30ХН3	100	200	100
13	Мазут 60	$\text{C}^\Gamma = 86,6$ $\text{H}^\Gamma = 10,7$ $\text{S}^\Gamma = 0,7$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 2$ $\text{A}^\text{P} = 0,2$ $\text{W}^\text{P} = 6$	300	1,2	Сталь 30	115	90	100
14	Мазут 60	$\text{C}^\Gamma = 87,6$ $\text{H}^\Gamma = 10,7$ $\text{S}^\Gamma = 0,7$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 1$ $\text{A}^\text{P} = 0,2$ $\text{W}^\text{P} = 3$	250	1,2	Сталь 30ХГС	120	100	100
15	Мазут 80	$\text{C}^\Gamma = 87,6$ $\text{H}^\Gamma = 10,6$ $\text{S}^\Gamma = 0,8$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 1$ $\text{A}^\text{P} = 0,2$ $\text{W}^\text{P} = 3$	200	1,25	Сталь 30Х	80	120	100
16	Мазут сірчастий	$\text{C}^\Gamma = 85$ $\text{H}^\Gamma = 11,8$ $\text{S}^\Gamma = 2,3$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 0,9$ $\text{A}^\text{P} = 0,15$ $\text{W}^\text{P} = 2$	300	1,22	Сталь 40ХН	60	140	90
17	Сланцеве масло	$\text{C}^\Gamma = 88,08$ $\text{H}^\Gamma = 7,66$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 4,26$ $\text{A}^\text{P} = 1$ $\text{W}^\text{P} = 3$	250	1,21	Сталь 15ХМ	100	200	80
18	Смола буровугільна	$\text{C}^\Gamma = 83$ $\text{H}^\Gamma = 7$ $\text{S}^\Gamma = 2\%$ $(\text{O}_2 + \text{N}_2)^\Gamma = 8$ $\text{A}^\text{P} = 1$ $\text{W}^\text{P} = 5$	300	1,24	Сталь 40Х	70	140	130
19	Природний газ	$\text{CH}_4 = 95,0$ $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2$ $\text{C}_2 = 0,1$ $\text{N}_2 = 4,7$	30	1,05	Сталь 20	120	150	120

Закінчення додатка 3

№ варіанта	Паливо				Розміри заготовки			Продуктивність, $N, \frac{\text{шт}}{\text{год}}$
	Вид	Склад, %	Повітря $t, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Матеріал	Діаметр, мм	Довжина, мм	
20	Мазут сірчистий	$C^{\Gamma} = 85$ $H^{\Gamma} = 11,8$ $S^{\Gamma} = 2,3$ $(O_2+N_2)^{\Gamma} = 0,9$ $A^P = 0,15$ $W^P = 2$	20	1,22	Сталь 30X13	50	300	140
21	Сланцеве масло	$C^{\Gamma} = 88$ $H^{\Gamma} = 7,6$ $(O_2+N_2)^{\Gamma} = 4,4$ $A^P = 1$ $W^P = 3$	300	1,21	Сталь 20X13	40	200	200
22	Природний газ	$CH_4 = 95,7$ $C_2 = 0,1$ $N_2 = 4,2$	40	1,05	Сталь 30X	80	120	50
23	Смола кам'яновугі льна	$C^{\Gamma} = 90$ $H^{\Gamma} = 7$ $S^{\Gamma} = 1$ $(O_2+N_2)^{\Gamma} = 2$ $A^P = 1$ $W^P = 5$	300	1,2	Сталь В8	95	150	115
24	Природний газ	$CH_4 = 88$ $C_2H_6 = 0,2$ $C_2 = 0,1$ $N_2 = 11,7$	300	1,1	Сталь 10кп	110	210	200
25	Природний газ	$CH_4 = 98$ $C_2 = 0,2$ $N_2 = 1,8$	10	1,05	Сталь 35	30	200	400
26	Мазут сірчистий	$C^{\Gamma} = 85$ $H^{\Gamma} = 11,8$ $S^{\Gamma} = 2,3$ $(O_2+N_2)^{\Gamma} = 0,9$ $A^P = 0,15$ $W^P = 4$	20	1,18	Сталь 3X13	50	300	140
27	Природний газ	$CH_4 = 94,4$ $C_2 = 0,6$ $N_2 = 5$	20	1,05	Сталь 30XH3	100	200	100
28	Природний газ	$CH_4 = 85,7$ $C_2H_6 = 11,3$ $C_2H_8 = 1,4$ $C_4H_{10} = 1,6$	20	1,04	Сталь 20	95	150	90
29	Газоподібне	$CH_4 = 80$ $N_2 = 20$	20	1,05	Сталь 30	50	250	120
30	Газоподібне	$CH_4 = 70$ $N_2 = 30$	20	1,05	Сталь Х6М	55	300	100

Додаток 4
Приклади розрахунків
Вихідні дані

Склад палива:

1) Газоподібне паливо, %:

$\text{CH}_4 = 91,5$

$\text{CO}_2 = 0,6$

$\text{N}_2 = 4,2$

$\text{C}_2\text{H}_6 = 2,3$

$\text{C}_4\text{H}_{10} = 1,1$

$\text{C}_3\text{H}_8 = 0,2$

$\text{C}_2\text{H}_8 = 0,1$

Температура повітря: $t_{\text{пов}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = 1,05$.

2) Рідке паливо, %:

$\text{C}^r = 84$

$\text{H}^r = 12$

$\text{S}^r = 2$

$\text{O}^r = 1$

$\text{N}^r = 1$

$\text{A}^p = 2$

$\text{W}^p = 4$

Температура повітря: $t_{\text{пов}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Діаметр заготовки: 90 мм.

Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = 1,2$. Довжина заготовки: 130 мм.

Матеріал заготовки: сталь 30Х. Продуктивність: 100 шт/год.

Звіт до індивідуального завдання повинен містити такі пункти:

1) Розрахунок горіння палива:

1.1) Розрахунок горіння рідкого палива;

1.2) Розрахунок горіння газоподібного палива.

2) Розрахунок часу нагрівання заданої заготовки.

3) Визначення розмірів робочого простору печі.

4) Вибір кладки. Компонування печі.

5) Тепловий баланс. Визначення витрати палива.

6) Основні техніко-економічні показники роботи печі.

Джерела інформації.

Продовження Додатка 4

Д.4.1. Розрахунок горіння палива
Д.4.1.1. Розрахунок горіння рідкого палива

Вихідні дані:

$C^{\Gamma} = 84 \%$, $H^{\Gamma} = 12 \%$, $S^{\Gamma} = 2 \%$, $O^{\Gamma} = 1 \%$, $N^{\Gamma} = 1 \%$, $A^P = 2 \%$, $W^P = 4 \%$.

Температура повітря: $t_{\text{пов}} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = 1,2$.

Визначити склад робочої маси палива:

$$X^P = X^{\Gamma}(100 - W^P - A^P)/100.$$

Робочий склад палива, %

$C^P = 78,96$,

$H^P = 11,28$,

$S^P = 1,88$,

$O^P = 0,94$,

$N^P = 0,94$,

$A^P = 2$,

$W^P = 4$.

Склад робочої маси палива:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100 \%$$

$$78,96 + 11,28 + 0,94 + 0,94 + 1,88 + 2 + 4 = 100.$$

Визначення кількості повітря, необхідного для повного згорання палива

Кількість кисню, необхідна для горіння:

$$\begin{aligned} V_{O_2} &= 0,01(1,867C^P + 5,6H^P + 0,7S^P - 0,7O^P) = \\ &= 0,01 \cdot (1,867 \cdot 78,96 + 5,6 \cdot 11,28 + 0,7 \cdot 1,88 - 0,7 \cdot 0,94) = 2,11 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Кількість теоретично необхідного повітря:

$$L_0 = (1+k)V_{O_2} = 4,76 \cdot 2,11 = 10,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсна кількість повітря, необхідного для горіння:

$$L\alpha = \alpha L_0 = 1,2 \cdot 10,06 = 12,07 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Продовження додатка 4

Кількість і склад продуктів горіння (ПГ):

Об'єм CO₂:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot 1,867 \cdot C^{\text{P}} = 0,01 \cdot 1,867 \cdot 78,96 = 1,47 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Сумарна кількість водяної пари в продуктах горіння:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01[11,2\text{H}^{\text{P}} + 1,24\text{W}^{\text{P}}] = 0,01 \cdot (11,2 \cdot 11,28 + 1,24 \cdot 4) = 1,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єм SO₂:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^{\text{P}} = 0,007 \cdot 1,88 = 0,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єм надлишкового кисню:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{над}} = (\alpha - 1) \cdot V_{\text{O}_2} = (1,2 - 1) \cdot 2,11 = 0,42 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єм азоту:

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot 0,8\text{N}^{\text{P}} + \kappa V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot 0,8 \cdot 0,94 + 3,76 \cdot 2,11 = 7,95 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єм надлишкового азоту:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = k \cdot V_{\text{O}_2}^{\text{над}} = 3,76 \cdot 0,42 = 1,59 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Сумарний об'єм азоту:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{сум}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = 7,95 + 1,59 = 9,54 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретична кількість продуктів згорання (диму):

$$V_0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} = 1,47 + 1,31 + 0,01 + 7,95 = 10,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Сумарний об'єм продуктів згорання:

$$V_{\alpha} = V_0 + V_{\text{O}_2}^{\text{над}} + V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = 10,75 + 0,42 + 1,59 = 12,76 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Склад вологих продуктів згорання:

$$\text{CO}_2^{\text{B}} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot 100}{V_{\alpha}} = (1,47 \cdot 100) / 12,76 = 11,55 \text{ \%};$$

Продовження додатка 4

$$H_2O^B = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_\alpha} = (1,31 \cdot 100) / 12,76 = 10,29 \%;$$

$$N_2^B = \frac{V_{N_2}^{сум} \cdot 100}{V_\alpha} = (9,54 \cdot 100) / 12,76 = 74,75 \%;$$

$$O_2^B = \frac{V_{O_2}^{над} \cdot 100}{V_\alpha} = (0,42 \cdot 100) / 12,76 = 3,31 \%;$$

$$SO_2^B = \frac{V_{SO_2} \cdot 100}{V_\alpha} = (0,01 \cdot 100) / 12,76 = 0,1 \%.$$

Склад сухих продуктів згоряння:

$$CO_2^C = \frac{V_{CO_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B} = (11,55 \cdot 100) / (100 - 10,29) = 12,88 \%;$$

$$N_2^C = \frac{V_{N_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B} = (74,75 \cdot 100) / (100 - 10,29) = 83,32 \%;$$

$$O_2^C = \frac{V_{O_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B} = (3,31 \cdot 100) / (100 - 10,29) = 3,69 \%;$$

$$SO_2^C = \frac{V_{SO_2}^B \cdot 100}{100 - V_{H_2O}^B} = (0,1 \cdot 100) / (100 - 10,29) = 0,11 \%.$$

Результати розрахунків вологих і сухих продуктів згоряння записати в таблицю Д1.

Таблиця Д.4.1 – результати розрахунків вологих і сухих продуктів згоряння

Стан продуктів згоряння	Продукти згоряння, %					Сума, %
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	O ₂	N ₂	
Вологі	11,55	10,29	0,1	3,31	74,75	100
Сухі	12,88	–	0,11	3,69	83,32	100

Щільність продуктів згоряння:

$$\rho_0 = 0,01(44CO_2^B + 28N_2^B + 18H_2O^B + 32O_2^B + 64SO_2^B) / 22,4 =$$

$$= 0,01 \cdot (44 \cdot 11,55 + 28 \cdot 74,75 + 18 \cdot 10,29 + 32 \cdot 3,31 + 64 \cdot 0,1) / 22,4 = 1,29 \text{ кг/м}^3.$$

Визначення температури горіння палива

Теплота згоряння мазуту:

$$Q_H^P = 340C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P =$$

$$= 340 \cdot 78,96 + 1030 \cdot 11,28 - 109 \cdot (0,94 - 1,88) - 25 \cdot 4 = 38057,42 \text{ кДж/кг.}$$

Продовження додатка 4

Хімічна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_x = Q_H^p / V_a = 38057,42/12,76 = 2982,17 \text{ кДж/м}^3.$$

Ентальпія повітря:

$$i_{\text{пов}} = C_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot \frac{L_a}{V_a} = 1,31 \cdot 250 \cdot 12,07/12,76 = 310,48 \text{ кДж/м}^3.$$

Ентальпія продуктів згоряння:

$$i = i_x + i_{\text{пов}} = 2982,17 + 310,48 = 3292,65 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретична температура згоряння: 1957,05 °С.

Дійсна температура згоряння:

$$t_n = \eta t = 0,7 \cdot 1957,05 = 1369,93 \text{ °С.}$$

Д.4.1.2. Розрахунок горіння газоподібного палива

Дано: паливо – природний газ.

CH₄ = 91,5 %, CO₂ = 0,6 %, N₂ = 4,2 %, C₂H₆ = 2,3 %, C₄H₁₀ = 1,1 %, C₃H₈ = 0,2 %, C₂H₈ = 0,1 %.

Температура повітря: $t_{\text{пов}} = 40 \text{ °С}$.

Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = 1,05$.

Склад палива:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_2\text{H}_8 + \text{CO}_2 + \text{N}_2 &= 100 \% ; \\ 91,5 + 2,3 + 1,1 + 0,2 + 0,1 + 0,6 + 4,2 &= 100. \end{aligned}$$

Визначення кількості повітря, необхідного для повного згоряння палива

Кількість кисню, необхідна для горіння:

$$\begin{aligned} V_{\text{O}_2} &= 0,01 \left[(m + n/4) \sum C_m H_n \right] = \\ &= 0,01 \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 4 \cdot \text{C}_2\text{H}_8) = \\ &= 0,01 \cdot (2 \cdot 91,5 + 3,5 \cdot 2,3 + 5 \cdot 0,2 + 6,5 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,1) = 2 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Кількість теоретично необхідного повітря:

$$L_0 = (1 + k)V_{\text{O}_2} = 4,76 \cdot 2 = 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Продовження додатка 4

Дійсна кількість повітря, необхідного для горіння:

$$L\alpha = \alpha L_0 = 1,05 \cdot 9,5 = 9,98 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Кількість і склад продуктів горіння (ПГ)

Об'єм RO_2 :

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= 0,01(\text{CO}_2 + m \sum C_m \text{H}_n) = \\ &= 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_8) = \\ &= 0,01 \cdot (0,6 + 91,5 + 2 \cdot 2,3 + 4 \cdot 1,1 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,1) = 1,02 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Водяна пара утворюється при горінні вуглеводнів, водню й сірководню. Тоді кількість водяної пари в продуктах повного горіння:

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,01(0,5n \sum C_m \text{H}_n) = \\ &= 0,01 \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_2\text{H}_8) = \\ &= 0,01 \cdot (2 \cdot 91,5 + 3 \cdot 2,3 + 5 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1) = 1,97 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Об'єм азоту:

$$V_{\text{N}_2} = 0,01\text{N}_2 + kV_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot 4,2 + 3,76 \cdot 2 = 7,55 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єм надлишкового кисню:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{над}} = (\alpha - 1) \cdot V_{\text{O}_2} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єм надлишкового азоту:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = k \cdot V_{\text{O}_2}^{\text{над}} = 3,76 \cdot 0,1 = 0,38 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Сумарний об'єм азоту:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{сум}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = 7,55 + 0,38 = 7,92 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретична кількість продуктів згорання (диму):

$$V_0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} = 1,02 + 1,97 + 7,55 = 10,53 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Загальна кількість продуктів згорання (диму):

$$V_\alpha = V_0 + V_{\text{O}_2}^{\text{над}} + V_{\text{N}_2}^{\text{над}} = 10,53 + 0,1 + 0,38 = 11,01 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Продовження додатка 4

Склад продуктів згоряння (диму):

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{RO}_2} \cdot 100}{V_\alpha} = (1,02 \cdot 100) / 11,01 = 9,26 \%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{V_\alpha} = (1,97 \cdot 100) / 11,01 = 17,86 \%;$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}^{\text{сум}} \cdot 100}{V_\alpha} = (7,92 \cdot 100) / 11,01 = 71,97 \%;$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{над}} \cdot 100}{V_\alpha} = (0,1 \cdot 100) / 11,01 = 0,91 \%.$$

Щільність продуктів згоряння:

$$\rho_0 = 0,01(44\text{CO}_2 + 28\text{N}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 32\text{O}_2) / 22,4 = \\ 0,01 \cdot (44 \cdot 9,26 + 28 \cdot 71,97 + 18 \cdot 17,86 + 32 \cdot 0,91) = 1,24 \text{ кг/м}^3.$$

Визначення температури горіння палива

Теплота згоряння газу:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 358 \cdot \text{CH}_4 + 636 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1185 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 590 \cdot \text{C}_2\text{H}_8 = \\ = 35764,9 \text{ кДж/м}^3.$$

Хімічна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_{\text{х}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_\alpha = 35764,9 / 11,01 = 3249,28 \text{ кДж/м}^3.$$

Ентальпія повітря:

$$i_{\text{пов}} = C_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot \frac{L_\alpha}{V_\alpha} = 1,3 \cdot 40 \cdot (9,98 / 11,01) = 47,11 \text{ кДж/м}^3.$$

Ентальпія продуктів згоряння:

$$i = i_{\text{х}} + i_{\text{пов}} = 3249,28 + 47,11 = 3296,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретична температура згоряння: 1958,79 °С.

Дійсна температура згоряння:

$$t_n = \eta t = 0,7 \cdot 1958,79 = 1371,15 \text{ °С.}$$

Продовження додатка 4

Д.4.2. Розрахунок часу нагрівання заданої заготовки

Вибір температурного режиму кування:

Температура початку й кінця кування береться за [3].

Матеріал: сталь 30Х.

$$t_{п.к} = 1250 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{к.к} = 800 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура робочого простору печі:

$$t_{п} = t_{п.к} + (50 \dots 100) = 1250 + 50 = 1300 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура кінця нагрівання:

$$t_{к.н.} = t_{п.к} + (0 \dots 50) = 1250 + 0 = 1250 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура початку нагрівання:

$$t_{п.н} = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha_{п+к} \cdot S}{\lambda} = (264,23 \cdot 0,04) / 36,5 = 0,33,$$

де $\alpha_{п+к}$ – розрахунковий сумарний коефіцієнт теплопередачі, що враховує променистий і конвективний теплообмін при температурі металу $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (тому що є небезпека появи термічних тріщин); S – товщина пластини або радіус циліндра $S = 0,04 \text{ м}$; $\lambda = 36,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ – коефіцієнт теплопровідності [4];

$$\begin{aligned} \alpha_{п+к} &= \frac{C_{ГКМ} \cdot \left[\left(\frac{T_{Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{М}}{100} \right)^4 \right]}{t_{Г} - t_{М}} + 12 = \\ &= 3,5 \cdot \left(\frac{(1300 + 273)}{100} \right)^4 - \left(\frac{(500 + 273)}{100} \right)^4 / (1300 - 500) + 12 = \\ &= 264,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Д.4.2.1. Аналітичний розрахунок часу нагрівання заготовок [1]

Сумарний коефіцієнт теплопередачі

Він враховує променистий і конвективний теплообмін для середньої температури металу, використовується для розрахунків часу нагрівання

$$t_{М} = 0,67 t_{к.н} = 0,67 \cdot 1250 = 837,5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ – середня температура металу.}$$

Продовження додатка 4

$$\alpha_{\text{п+к}} = \frac{C_{\text{гкм}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}} + 12 =$$

$$= 3,5 \cdot [((1300 + 273)/100)^4 - ((837,5 + 273)/100)^4] / (1300 - 837,5) + 12 =$$

$$= 360,22 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Час нагрівання:

$$\tau_{\text{н}}' = \frac{S \cdot \rho \cdot C}{k_1 \cdot \alpha_{\text{п+к}}} \cdot \ln \left(\frac{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{поч}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{кін}}} \right) \cdot m,$$

де k_1 – коефіцієнт форми (для циліндра $k_1 = 2$); S – товщина пластини або радіус циліндра $S = 0,04$ м; C – середня питома теплоємність, $678 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ [4];

ρ – питома вага при середній температурі, $7506 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [4]; $\alpha_{\text{п+к}}$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі, що враховує променистий і конвективний теплообмін для середньої температури $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $t_{\text{г}} = t_{\text{п}}$ – температура газів печі; $t_{\text{м}}^{\text{кін}}$ – кінцева температура заготовки, °С; $t_{\text{м}}^{\text{поч}}$ – початкова температура заготовки, °С; m – коефіцієнт урахування виправлення на масивність [1].

$$m = 1 + \left[\frac{(k_3 - 1)}{(k_2 \cdot k_3)} \right] \text{Bi} = 1 + [(1,97 - 1)/(1,93 \cdot 1,97)] 0,33 = 1,08;$$

$$k_3 = 1,97, k_2 = 1,93,$$

де k_3, k_2 – коефіцієнти, залежні від Bi .

$$\tau_{\text{н}}' = \frac{S \cdot \rho \cdot C}{k_1 \cdot \alpha_{\text{п+к}}} \cdot \ln \left(\frac{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{поч}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{кін}}} \right) m =$$

$$= (0,04 \cdot 7506 \cdot 678) / (2 \cdot 360,22) \ln[(1300 - 20)/(1300 - 1250)] 1,08 =$$

$$= 1116,64 \text{ с} = 1116,64/60 = 18,61 \text{ хв}.$$

Оскільки заготовки в печі розташовуються на відстані, що дорівнює $1/2$ діаметра, то необхідно ввести поправковий коефіцієнт $k = 1,32$, який враховує взаємне розташування заготовок.

Співвідношення довжини заготовки до її діаметра $l/d = 1,44$, тоді коефіцієнт, враховуючий торцеві потоки, $k_l = 0,82$.

Тоді:

$$\tau_{\text{н}}' = \tau_{\text{н}}' \cdot k \cdot k_l = 18,61 \cdot 1,32 \cdot 0,82 = 20,06 \text{ хв} = 20,06/60 = 0,33 \text{ год}.$$

Продовження додатка 4

Д.4.3. Визначення розмірів робочого простору печі

Вагова продуктивність печі:

$$G = N \cdot g = 100 \cdot 6,47 = 646,73 \text{ кг/год},$$

де g – вага однієї заготовки, що нагрівається;

$$g = V \cdot \rho = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot \rho = (3,14 \cdot 0,13 \cdot 7820 \cdot 0,092) / 4 = 6,47 \text{ кг};$$

N – штучна продуктивність печі, знаходиться з умови завдання.

Значення садки:

$$n = N \cdot \tau_n = 100 \cdot 0,33 = 34 \text{ шт},$$

де τ_n – розрахунковий час нагрівання, год.

Активна площа поду:

$$F_{\text{акт}} = n \cdot f = 34 \cdot 0,01 = 0,4 \text{ м}^2,$$

де f – площа проекції заготовок на под печі,

$$f = d \cdot l = 0,09 \cdot 0,13 = 0,01 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт завантаження поду:

$$k_{\text{поду}} = \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{поду}}},$$

для камерних печей приймаємо $k_{\text{пода}} = 0,4$.

Площа поду:

$$F_{\text{поду}} = \frac{F_{\text{акт}}}{k_{\text{поду}}} = 0,4 / 0,4 = 0,99.$$

Вагова продуктивність поду:

$$P = \frac{G}{F_{\text{поду}}} = 646,73 / 0,99 = 650,31 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}.$$

Остаточню визначаємо розміри робочого простору печі.

Ширина поду:

$$B = n_1 \cdot l_3 + (n_1 + 1) \cdot (d_3 / 2) = 4 \cdot 0,13 + (4 + 1) \cdot 0,09 = 0,97 \text{ м},$$

де n_1 – число рядів; l_3 – довжина заготовки, м; d_3 – діаметр заготовки або її ширина, м.

Продовження додатка 4

Довжина поду:

$$L = n_2 \cdot d_3 + (n_2 + 1) \cdot a = 9 \cdot 0,09 + (9 + 1) \cdot 0,04 = 1,26 \text{ м},$$

де n_2 – кількість заготовок у ряді, шт; a – відстань між заготовками, м.

Висота робочого простору печі:

$$H = (0,6 \dots 0,8) \cdot B = 0,8 \cdot 0,97 = 0,78 \text{ м}.$$

Уточнюємо параметри печі:

$$n = n_1 \cdot n_2 = 36 \text{ шт.}$$

Активна площа поду:

$$F_{\text{акт}} = n \cdot f = 36 \cdot 0,01 = 0,42 \text{ м}^2.$$

Площа поду:

$$F_{\text{поду}} = B \cdot L = 0,97 \cdot 1,26 = 1,22 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт завантаження поду:

$$k_{\text{поду}} = \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{поду}}} = 0,42/1,22 = 0,34.$$

Вагова продуктивність поду:

$$P = \frac{G}{F_{\text{поду}}} = 698,47/1,22 = 571,49 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$$

Виконати ескіз поду, що включає розміщення заготовок на поді печі, зазори і габаритні розміри (рис. Д.4.1).

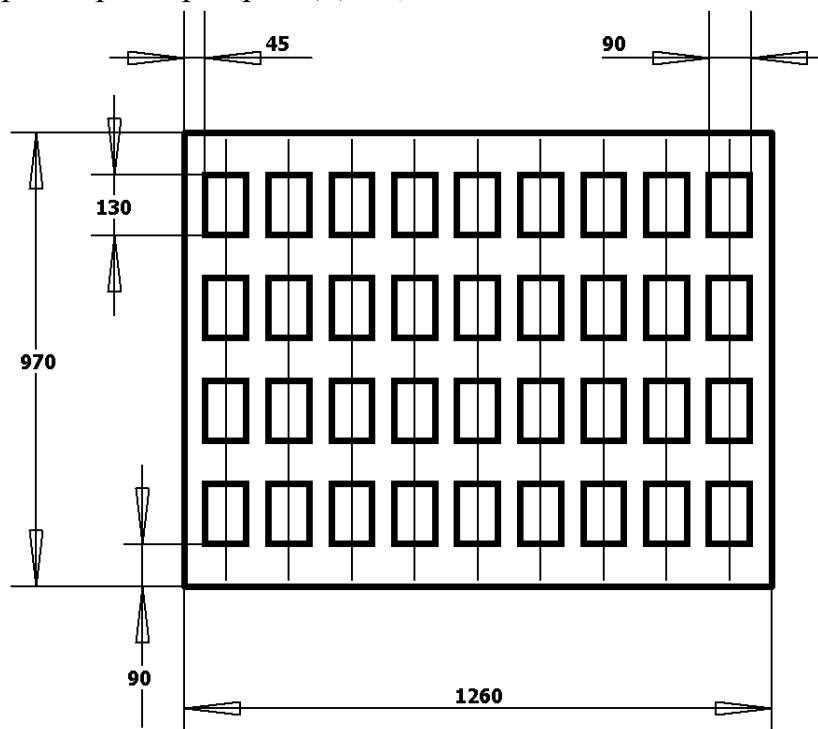


Рисунок Д.4.1 – Компонування поду печі

Продовження додатка 4

Д.4.4. Вибір кладки. Компонування печі

Вогнетривкі шари печі виконуємо із шамоту класу Б товщиною в 1 цеглу – 230 мм.

Теплоізоляційні шари стін і поду виконуємо з діатомітової цегли, товщиною в 1/2 цегли – 115 мм.

Для захисту від механічного впливу й усунення фільтрації газів застосовуємо кожух товщиною 4 мм.

Звід печі виконується аркового типу. Вогнетривкий шар виконується із шамотної фасонної (клин-торець) і прямої цегли. Товщина вогнетривкого шару 230 мм. Для зменшення втрат тепла через кладку зверху здійснюємо засипання інфузornoю землею й покриваємо ущільнювальною обмазкою. Товщина засипання 115 мм (рис. Д.4.2).

Под печі виконується тришаровим:

1-й шар – хромомагнетит (товщина 60 мм);

2-й шар – шамот (товщина 230 мм);

3-й шар – діатоміт (товщина 115 мм).

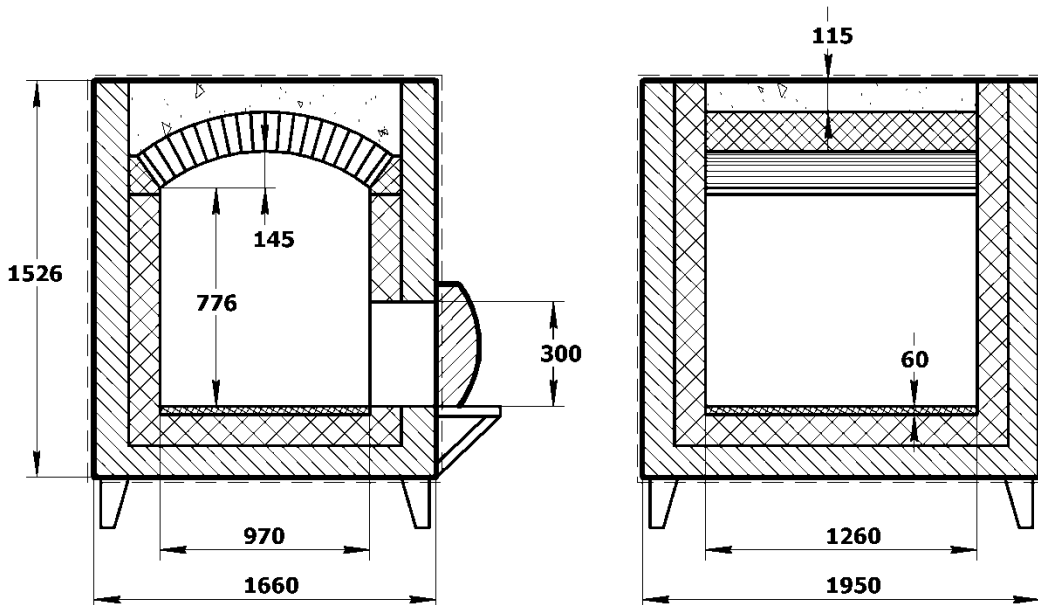


Рисунок Д.4.2 – Вибір кладки поду печі

Розміри вікна завантаження/вивантаження:

Висота вікна:

$$H_{\text{вікна}} = 0,3 \text{ м.}$$

Ширина вікна:

$$B_{\text{вікна}} = \frac{2}{3} B = \frac{2}{3} \cdot 0,97 = 0,65 \text{ м.}$$

Товщина вікна:

$$S_{\text{вікна}} = 0,34 \text{ мм.}$$

Д.4.5. Тепловий баланс. Визначення витрати палива

Д.4.5.1. Прибуткові статті балансу

Хімічна теплота палива

$$Q_x = B \cdot Q_n^p = 35764,9 \cdot B = 35764,9 \cdot B \text{ кВт},$$

де B – невідома поки витрата палива, $\text{м}^3/\text{с}$ або $\text{кг}/\text{с}$; Q_n^p – нижча теплота згоряння палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$ або $\text{кДж}/\text{кг}$.

Тепло, внесене підігрітим повітрям

$$Q_B = B \cdot L_\alpha \cdot C_B \cdot t_B = 9,98 \cdot 1,3 \cdot 40 \cdot B = 518,59 \cdot B \text{ кВт},$$

де L_α – дійсна витрата повітря на одиницю палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$; C_B – теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_B – температура підігрітого повітря, $^\circ\text{C}$.

Тепло від екзотермічної реакції горіння заліза

$$Q_{\text{екз}} = q \cdot G \cdot a = 5650 \cdot 0,18 \cdot 0,02 = 20,3 \text{ кВт},$$

де G – секундна вагарня продуктивність, $\text{кг}/\text{с}$; a – вигар сталі, %. Для камерних ковальських печей $a = 0,02 \dots 0,03$ %; приймаємо $a = 0,02$; $q = 5650 \text{ кДж}/\text{кг}$ – кількість тепла, одержуване при окисненні 1 кг заліза.

Д.4.5.2. Видаткові статті балансу

Тепло, затрачуване на нагрівання сталі

$$Q_1 = G \cdot C \cdot (t_k - t_n) = 0,18 \cdot 0,68 \cdot (1250 - 20) = 149,82 \text{ кВт},$$

де C – середня теплоємність металу, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_k і t_n – кінцева й початкова температура металу, $^\circ\text{C}$.

Втрати тепла з газами, що виходять

$$Q_2 = 1,05 \cdot B \cdot V_\alpha \cdot C_{\text{пз}} \cdot t_{\text{пз}} = 1,05 \cdot 11,01 \cdot 1,58 \cdot 1300 \cdot B = 23738,81 \cdot B \text{ кВт},$$

де V_α – обсяг газів на одиницю палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$; $C_{\text{пз}} = 1,58$ – середня теплоємність продуктів згоряння, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{пз}}$ температура газів, що виходять із печі, $^\circ\text{C}$.

Продовження додатка 4

Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння палива

$$Q_3 = B \cdot Q_n^p \cdot k_{зг} = 35764,9 \cdot 0,02 \cdot B = 715,3 \cdot B, \text{ кВт},$$

де $k_{зг}$ – коефіцієнт неповноти згоряння, $k_{зг} = 0,02$.

Втрати тепла через кладку, відкрите вікно й невраховані втрати

$$Q_4 = Q_{кл} + Q_{відкр} + Q_{неврах}.$$

1) Теплопровідності використовуваних матеріалів мають такі значення, Вт/(м·°C):

- шамот $\lambda = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} t$;
- хромомагнетит $\lambda = 7,2 - 4,2 \cdot 10^{-3} t$;
- діатомітова цегла $\lambda = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} t$.

Значення теплопровідності шарів необхідно вибрати за середніми температурами, які можна обчислити за наступними формулами.

Двошарова кладка:

Середня температура

- внутрішнього шару: $t_1 = 0,5 \cdot (t_{п} + t_{пов}) = 0,5 \cdot (1300 + 20) = 660 \text{ °C}$;
- зовнішнього шару: $t_2 = 0,5 \cdot (t_1 + t_{пов}) = 0,5 \cdot (660 + 20) = 340 \text{ °C}$,

де $t_{пов}$ – температура навколишнього повітря (приймаємо $t_{пов} = 20 \text{ °C}$),
 $t_{п}$ – температура робочого простору печі, °C.

Тоді теплопровідності шарів:

- шамот $\lambda = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} t = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} \cdot 660 = 1,14 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$;
- діатомітова цегла $\lambda = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} t = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot 340 = 0,27 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Тришарова кладка:

Середня температура

- внутрішнього шару: $t_1 = 0,5 \cdot (t_{п} + t_2) = 0,5 \cdot (1300 + 660) = 980 \text{ °C}$;
- проміжного шару: $t_2 = 0,5 \cdot (t_{п} + t_g) = 0,5 \cdot (1300 + 20) = 660 \text{ °C}$;
- зовнішнього шару: $t_3 = 0,5 \cdot (t_2 + t_{пов}) = 0,5 \cdot (660 + 20) = 340 \text{ °C}$,

де $t_{пов}$ – температура навколишнього повітря (приймаємо $t_{пов} = 20 \text{ °C}$),
 $t_{п}$ – температура робочого простору печі, °C.

- шамот $\lambda = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} t = 1,04 + 1,51 \cdot 10^{-4} \cdot 660 = 1,14 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$;

Продовження додатка 4

• діатомітова цегла $\lambda = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} t = 0,16 + 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot 340 = 0,27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;

• хромомagneзит $\lambda = 7,2 - 4,2 \cdot 10^{-3} t = 7,2 - 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 980 = 3,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

2) Суми теплових опорів окремих частин кладки R :

• *поду*:

$$R_{\text{под}} = S_1 / \lambda_1 + S_2 / \lambda_2 + S_3 / \lambda_3 = \\ = 0,12/0,27 + 0,23/1,14 + 0,06/3,08 = 0,65 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт},$$

де S_1, S_2, S_3 – товщини шарів поду; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – відповідні теплопровідності:

• *зводу*: $R_{\text{звід}} = S_1 / \lambda_1 + S_2 / \lambda_2 = 0,12/0,27 + 0,23/1,14 = 0,63 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$,

де S_1, S_2 – товщини шарів зводу; λ_1, λ_2 – відповідні теплопровідності;

• *стінки*: $R_{\text{стін}} = S_1 / \lambda_1 + S_2 / \lambda_2 = 0,12/0,27 + 0,23/1,14 = 0,63 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$,

де S_1, S_2 – товщини шарів стін; λ_1, λ_2 – відповідні теплопровідності.

3) Площі зовнішніх поверхонь, м^2 :

• *передньої й задньої стінки*: $F_{\text{пс}} = F_{\text{зс}} = L_{\text{н}} \cdot H_{\text{н}} = 1,95 \cdot 1,53 = 2,98 \text{ м}^2$;

• *торцевої стінки*: $F_{\text{тс}} = B_{\text{н}} \cdot H_{\text{н}} = 1,66 \cdot 1,53 = 2,53 \text{ м}^2$;

• *зводу*: $F_{\text{звід}} = B_{\text{н}} \cdot L_{\text{н}} = 1,66 \cdot 1,95 = 3,24 \text{ м}^2$;

• *поду*: $F_{\text{під}} = B_{\text{н}} \cdot L_{\text{н}} = 1,66 \cdot 1,95 = 3,24 \text{ м}^2$,

де $B_{\text{н}}, L_{\text{н}}, H_{\text{н}}$ – зовнішні розміри печі.

4) Коефіцієнти тепловіддачі для зовнішніх поверхонь кладки α :

• *зводу* $\alpha_{\text{зв}} = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;

• *стінки* $\alpha_{\text{ст}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;

• *поду* $\alpha_{\text{п}} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

5) Теплові втрати кладкою в навколишній простір:

Для обчислення втрат скористаємося формулою

$$Q = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F}{(1/\alpha_{\text{г}} + \sum \frac{S_i}{\lambda_i} + 1/\alpha)},$$

де $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{пов}}$ – відповідно температура газів у печі й навколишнього її повітря, $^\circ\text{С}$; F – зовнішня поверхня кладки, м^2 ; $\alpha_{\text{г}}$ і α – коефіцієнти тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; λ_i – теплопровідність i -го шару, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; S_i – товщина шару, м ; $1/\alpha_{\text{г}}$ – тепловий опір тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні кладки, приймаємо рівним $1/348 = 0,003 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$.

Продовження додатка 4

Втрати зводом:

$$Q_{\text{звід}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{с}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{звід}} + 1/\alpha)} =$$
$$= ((1300 - 20) \cdot 3,24)/(0,003 + 0,63 + 1/35) = 6240,6 \text{ Вт.}$$

Втрати подом:

$$Q_{\text{під}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{п}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{під}} + 1/\alpha)} =$$
$$= ((1300 - 20) \cdot 3,24)/(0,003 + 0,65 + 1/15) = 5742,81 \text{ Вт.}$$

Втрати торцевими стінами:

$$Q_{\text{тс}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{тс}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{стін}} + 1/\alpha)} =$$
$$= ((1300 - 20) \cdot 2,53)/(0,003 + 0,63 + 1/25) = 4801,48 \text{ Вт.}$$

Втрати передньої й задньої стінок:

$$Q_{\text{зпс}} = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \cdot F_{\text{пс}}}{(1/\alpha_{\text{г}} + R_{\text{стін}} + 1/\alpha)} =$$
$$= ((1300 - 20) \cdot 2,98)/(0,003 + 0,63 + 1/25) = 5640,3 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати кладкою:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{звід}} + Q_{\text{під}} + 2 \cdot Q_{\text{тс}} + 2 \cdot Q_{\text{зпс}} =$$
$$= 6240,6 + 5742,81 + 2 \cdot 4801,48 + 2 \cdot 5640,3 = 32866,97 \text{ Вт.}$$

б) Втрати тепла через відкрите вікно:

$$Q_{\text{відкр}} = C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{отв}} \cdot \tau_{\text{відкр}} \cdot k_{\text{д}},$$

де $\tau_{\text{відкр}}$ – час відкриття вікна, $\tau_{\text{відкр}} = t_{\text{нагр}} \cdot 0,3 = 0,33 \cdot 0,3 = 0,1$;
 $F_{\text{отв}} = 0,65 \cdot 0,3 = 0,19$ – площа отвору; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C})$; $k_{\text{д}}$ – коефіцієнт діафрагмування; $k_{\text{д}} = (1 + \phi_{1-2})/2 = (1 + 0,15)/2 = 0,58$, де ϕ_{1-2} – кутовий коефіцієнт із поверхні F_1 на F_2 ; $\phi_{1-2} = L/(L + S) = 0,26/(0,26 + 0,34) = 0,15$, де L – еквівалентний розмір порожнини вікна,

$$L = \frac{4 \cdot a \cdot b \cdot s}{2 \cdot (a \cdot b + b \cdot s + s \cdot a)} =$$

$$= (4 \cdot 0,3 \cdot 0,65 \cdot 0,34)/(2 \cdot (0,3 \cdot 0,65 + 0,65 \cdot 0,34 + 0,34 \cdot 0,3)) = 0,26 \text{ м,}$$

де a, b, s – висота, ширина й товщина вікна відповідно

Продовження додатка 4

$$Q_{\text{відкр}} = C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{отв}} \cdot \tau_{\text{відкр}} \cdot k_{\text{д}} =$$

$$= 5,7 \cdot [((1300 + 273)/100)^4 - ((20 + 273)/100)^4] \cdot 0,19 \cdot 0,1 \cdot 0,58 = 3916,56 \text{ Вт.}$$

7) Інші втрати:

Невраховані втрати приймаємо рівними 5 % від втрат тепла кладкою в навколишній простір

$$Q_{\text{неврах}} = (Q_{\text{кл}} + Q_{\text{відкр}}) \cdot 0,05 = (32866,97 + 3916,56) \cdot 0,05 = 1839,18 \text{ Вт.}$$

Тоді втрати тепла через кладку, відкрите вікно та інші втрати:

$$Q_4 = Q_{\text{кл}} + Q_{\text{відкр}} + Q_{\text{неврах}} = 32866,97 + 3916,56 + 1839,18 = 38622,7 \text{ Вт.}$$

Д.4.5.3. Рівняння теплового балансу

$$Q_x + Q_{\text{екз}} + Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 =$$

$$= 35764,9 \cdot B + 20,3 + 518,59 \cdot B = 149,82 + 23738,81 \cdot B + 715,3 \cdot B + 38,62.$$

Вирішуємо рівняння й знаходимо B – витрату палива:

$$B = (149,82 + 38,62 - 20,3) / (35764,9 + 518,59 - 23738,81 - 715,3) =$$

$$= 168,14 / 11829,38 = 0,0142136 \text{ кг/с} = 51,17 \text{ кг/год.}$$

Обчислюємо значення окремих статей балансу (Q_x , Q_B , Q_2 , Q_3), пов'язаних з витратою палива B :

$$Q_x = 35764,9 \cdot 0,0142136070064038 = 508,35 \text{ кВт};$$

$$Q_B = 518,59 \cdot 0,0142136070064038 = 7,37 \text{ кВт};$$

$$Q_2 = 23738,81 \cdot 0,0142136070064038 = 337,41 \text{ кВт};$$

$$Q_3 = 715,3 \cdot 0,0142136070064038 = 10,17 \text{ кВт.}$$

Отримані результати записуємо в таблицю Д.4.2.

Таблиця Д.4.2 – Тепловий баланс

Статті приходу теплоти	Числове значення		Статті витрат теплоти	Числове значення	
	кВт	%		кВт	%
Хімічна теплота палива	508,35	94,84	На нагрівання сталі	149,82	27,95
Фізична теплота повітря	7,37	1,38	З димовими газами	337,41	62,95
Теплота екзотермічної реакції	20,3	3,79	З хімічним непалом	10,17	1,9
			Втрати через кладку, відкрите вікно та інші втрати	38,62	7,21
Усього:	536,02	100	Усього:	536,02	100

Закінчення додатка 4

Д.4.6. Основні техніко-економічні показники роботи печі

Термічний ККД

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{Q_{\text{мет}}}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100 \% = 149,82/536,02 \cdot 100 \% = 27,95 \%$$

Ефективний ККД

Показує ефективність використання палива:

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{мет}}}{Q_{\text{палив}}} \cdot 100 \% = 149,82/508,35 \cdot 100 \% = 29,47 \%$$

Питома витрата палива (на нагрівання 1кг (т) металу)

$$b = \frac{B}{G} = 51,17/0,65 = 79,12 \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}}$$

Питома витрата умовного палива

$$b_{\text{ум}} = \frac{B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{G \cdot 29300} = (51,17 \cdot 35764,9)/(0,65 \cdot 29300) = 96,58 \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}}$$

Напруженість площі поду

$$b = \frac{G}{F_{\text{пода}}} = 646,73/1,22 = 571,49 \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}}$$

ВИСНОВКИ

Відповідно до завдання кафедри мною спроектована камерна нагрівальна піч із параметрами, відповідними вимогам, пропонуваним до печей ковальського виробництва. Передбачений також рекуператор для підігріву первинного повітря.

Навчальне видання

КУЗЬМЕНКО Віктор Іванович
ОКУНЬ Антон Олександрович

ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВАННЯ Й НАГРІВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ
КОВАЛЬСЬКО-ШТАМПУВАЛЬНИХ ЦЕХІВ

Навчально-методичний посібник
з курсу «Технологія нагрівання й нагрівальні пристрої ковальсько-
штампувальних цехів»
для студентів освітньої програми «Прикладна механіка»
денної і заочної форми навчання

Відповідальний за видання *проф. В. Л. Чухліб*
Роботу до видання рекомендував *проф. О. М. Шелковий*

Редактор *О. І. Шпільова*

План 2020 р., поз. 57

Самостійне електронне видання