

Gázdugattyús automatikák számításai normál üzemállapot esetén

A tanulmány a gázfelvételes, azon belül is a gázdugattyús rendszerű automata fegyverek gázmotorjainak rendszerszintű fizikai leírásával foglalkozik. Ismerteti a gázmotor és kapcsolt rendszerei közötti összefüggéseket, egyenleteket. Szimulációs számítások eredményeit közli, azokról következtetéseket von le, valamint szimulációs paraméterek beállítására ad eljárást, mérési adatokból számított eredmények felhasználásával. Ismerteti a nagy sebességű videófelvevételek feldolgozásának metodikáját egy mérési feladat kiértékelésének bemutatásával.

Kulcsszavak: belső ballisztika, ballisztikai lengőrendszer, automata fegyver, gázmotor, gázdugattyú, normál üzemállapot

Calculations for Gas-Operated Automatic Weapons in Case of Normal Operating Condition

This paper deals with the system-level physical description of gas engines for gas-operated automatic weapons, including gas-piston automatic weapons. It shows the relationships and equations between the gas engine and the receiver-actuator systems, presents the results of simulation calculations and draws conclusions from them. The study also provides a procedure for setting simulation parameters using results calculated from measured data and describes the methodology for processing high-speed video recordings showing the evaluation of a measurement task.

Keywords: internal ballistics, ballistic pendulum system, automatic weapon, gas engine, gas piston, normal operating condition

Bevezetés

A sorozatlövő fegyverek automatikájuk működése szempontjából két fő csoportba sorolhatók: az egyik a löporgázok energiáját közvetlenül felhasználó, a másik a lövés impulzusát közvetetten kihasználó műszaki megoldások csoportja. A két megvalósítás

¹ Szakoktató, Diana Fegyvertechnikai Technikum és Kollégium; e-mail: vozsech.istvan@dianaszki.hu; ORCID: 0000-0001-9818-7755.

merőben más fizikai elven alapul. Itt csak a löporgázok energiáját közvetlenül felhasználó megoldások egyik kialakításával foglalkozunk, a gázdugattyús konstrukcióval.

A számítási összefüggéseket általános esetekre, a számítási és mérési eredményeket pedig az AMMSZ (AK–63D) gépkarabélyra adjuk meg. Ezek az úgynevezett *normál üzemállapotú rendszerre* vonatkoznak, ahol a gázmegcsapolási pont a fegyvercső csőszáj felőli harmadában van. (A *normál üzemállapot* jelentse a továbbiakban a hagyományos tervezésű fegyverek rendeltetésszerű működéséhez tartozó üzemállapotot.)

A tanulmányban szereplő, vizsgált rendszereket és azok elemeit az elkülöníthetőség érdekében *dőlt formázással* írjuk.

Célkitűzés

Célunk olyan, viszonylagosan egyszerű koncentrált paraméterű modellt alkotni, amely (gáz)dinamikai, hőtani, lengéstani differenciálegyenlet-rendszerek felhasználásával a fegyverek tervezési fázisában használható, a leendő konstrukció működésének, dinamikai viszonyainak előzetes meghatározására. Azt is célul tűztük ki, hogy modellünk a valós viszonyokat legfeljebb 10%-os relatív hibával megközelítse, valamint modellfuttatások során szimuláljuk (a fegyver gázmotorjának elkökszolódása miatt) az automatika működésében bekövetkező változásokat.

Hazai és nemzetközi szakirodalom

Munkánk során két meghatározó ballisztikai forrás anyagát tanulmányoztuk. Ezekben a művekben a feladat megoldására találunk ugyan eljárásokat, de Viktor Mihajlovics Kirillov könyvének² születésekor a digitális számítástechnikai lehetőségek még csak korlátozottan voltak hozzáférhetők, ezért a szovjet írásban ismertettek mára elavultnak tekinthetők. Donald E. Carlucci és Sidney S. Jacobson gondolkodásmódja és logikája döntően azonos a miénkkel, de az általa közölt módszer csak a tervezési üzemállapot folyamatait tárgyalja, és azokat sem bontja szét fázisokra.³

Az egyes műszaki megoldások tanulmányozására George M. Chinn művét⁴ használtuk, a lengéstani modellek felállításához, egyenletek felírásához pedig Csernák Gábor és Stépán Gábor *Rezgésan*,⁵ Égert János és Jezsó Károly *Mechanika. Rezgésan*,⁶ továbbá Zalka Károly *Mechanika II. Szilárdságtan*⁷ című könyvét hívtuk segítségül.

² KIRILLOV 1973.

³ CARLUCCI–JACOBSON 2018.

⁴ CHINN 1951.

⁵ CSERNÁK–STÉPÁN 2019.

⁶ ÉGERT–JEZSÓ 2006.

⁷ ZALKA 2015.

Problémafelvetés

Egy automata vagy félautomata (ez esetünkben egyenértékű) lőfegyver automatikája dinamikai szempontból viszonylag bonyolult, lengőrendszerekből összeálló kapcsolt rendszer. Ezeket az alrendszereket önmagukban vizsgálni vagy értékelni csak megkötések mellett lehet, viszont szétválasztásuk megkönnyíti az egyes konstrukciós egységek tervezését.

Ezen lengőrendszerek gerjesztését, energiával történő ellátását minden esetben maga a lövésfolyamat biztosítja, amely a magas nyomású löporgázok hatására a fegyvercsőből kirepülő lövedékkel meghatározott folyamat. A szerelt fegyvercső alkatелеmei, azok összeállításai a fegyver ballisztikai rendszerét képezik.

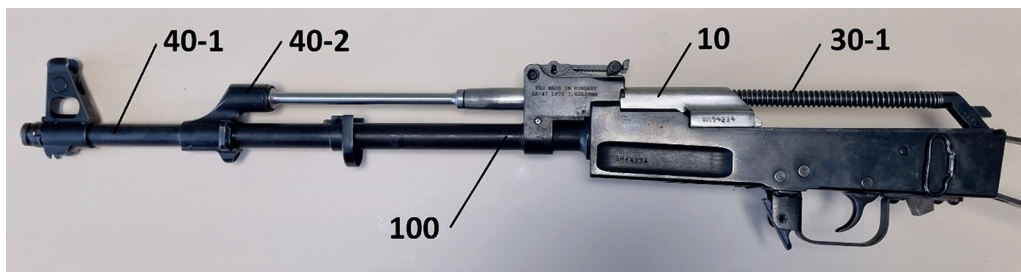
Ennek a ballisztikai rendszernek lehetnek, a gázdugattyús rendszerű fegyvereknek pedig kötelezően van/vannak kapcsolt ballisztikai alrendszerei. A gázdugattyús fegyverek közös jellemzője, hogy a szerelt fegyvercső a tokszerkezetbe mereven beépített, valamint minden alkatrésze a csőhöz mereven rögzített. Mivel a fegyvercső és szerelvényei között relatív elmozdulás nincs, ezért a szerelt csövet az automatika működése szempontjából kizárólag ballisztikai rendszerként kezeljük, dinamikai hatása az automatikára nézve nincs.

Milyen rendszerekből áll össze egy gázdugattyús fegyver automatikája, mik az alrendszerek, azoknak mik a feladatuk és a sajátosságaik, milyen fizikai törvényekkel lehet leírni a működésüket? Ezekre a kérdésekre keresünk válaszokat.

Az automatika két nagyobb alrendszere a zárszerkezet és a csőszerkezet (szerelt cső). Működését tekintve az első mechanikai lengő, a második tisztán ballisztikai rendszer. Bár megkötésekkel a két alrendszer szétkapcsolható, ettől függetlenül a szerelt csövet ballisztikai szempontból tovább kell bontanunk. Említettük, hogy a szerelt cső az automatikára nézve tisztán ballisztikai rendszer, de amennyiben kíváncsiak vagyunk a lengési jellemzőire is, úgy fel kell állítanunk a lengéstani modelljét is.

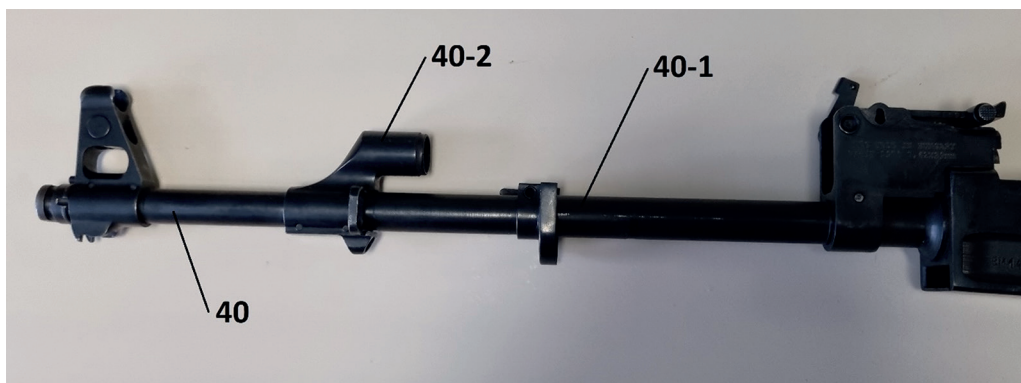
A szerelt csövet további két ballisztikai rendszerre tudjuk osztani: az egyik a csőfurat–löporgáz–lövedék–légoszlop, a másik a gázátömlő furat–löporgáz–gázhengerfurat–gázdugattyú rendszer. A gázdugattyú viszont a zárszerkezetrendszernek is a része. Ez előtervezési szinten ugyan leválasztható a gázhengerrendszerrel, de pontosabb számításoknál ez már nem engedhető meg, valamint ezzel az egyszerűsítéssel az automatika tranziens jelenségeit sem tudjuk nyomon követni.

Modellállításunknál öt fő feladatot kell megoldanunk, de ezek ismertetése előtt vegyük sorra a rendszereket bemutató ábrákat.



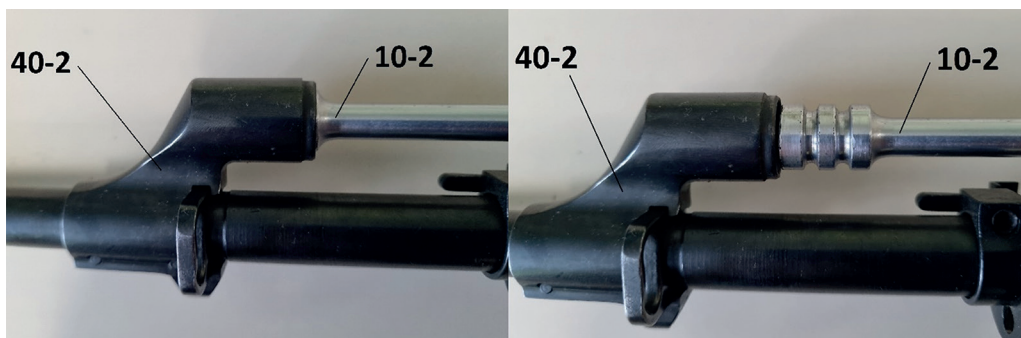
1. ábra: A redukált automatika főrendszer (100). Elemei: a szerelt zárkeret (10) a súlytalan helyretelő rugóval (30-1), a fegyvercső (40-1) és a gázhenger (40-2)

Forrás: a szerző felvétele



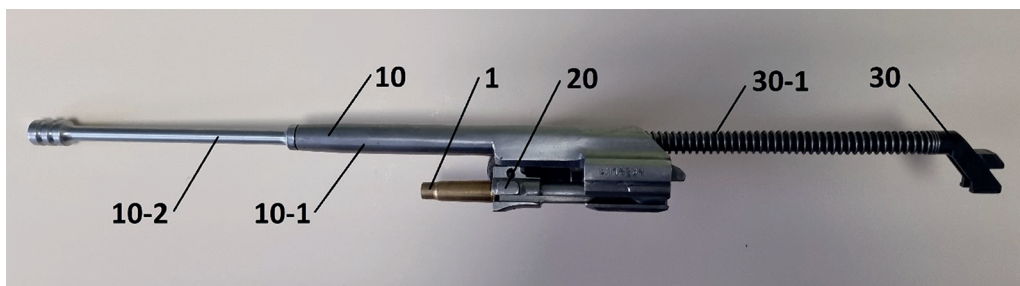
2. ábra: A redukált fegyvercsőrendszer (40). Elemei: a fegyvercső (40-1) és a gázhenger (40-2)

Forrás: a szerző felvétele



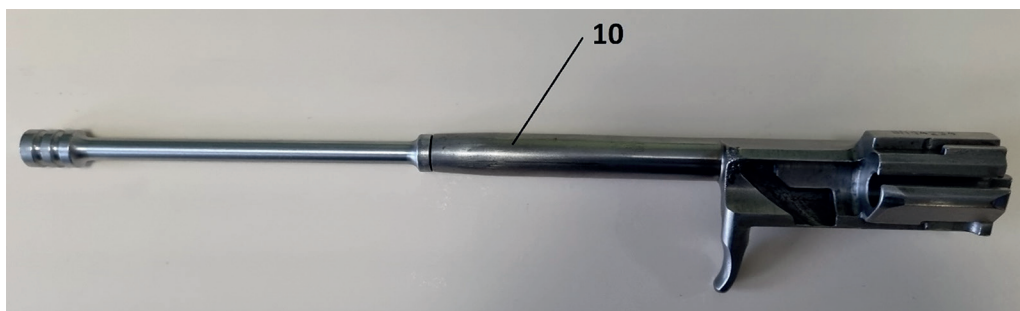
3. ábra: A redukált gázhengerrendszer és kontakt tartományának határai. A rendszerkapcsolatot a gázdugattyú (10-2) határolja. A redukált gázhengerrendszer egyetlen eleme: a gázhenger (40-2)

Forrás: a szerző felvétele



4. ábra: A zárszerkezetrendszer. Elemei: a szerelt zárkeret (10), a szerelt zárfej (20), az ellőtt hüvely (1) és a súlyos helyretoló rugó (30-1)

Forrás: a szerző felvétele



5. ábra: A redukált zárszerkezetrendszer. Egyetlen eleme: a szerelt zárkeret (10)

Forrás: a szerző felvétele

Az öt fő feladat rendre:

1. A zárszerkezetrendszert (4. ábra) le kell egyszerűsíteni a mozgás kezdeti tartományában szerepet játszó alkatrészek figyelembevételével, elnevezve ezt *redukált zárszerkezetrendszernek* (5. ábra).
2. A gázátömlő furat–lőporgáz–gázhengerfurat rendszert le kell egyszerűsíteni a mozgás zárszerkezetrendszert érintő kontakt tartományában, elnevezve ezt *redukált gázhengerrendszernek* (3. ábra).
3. A csőfurat–lőpor–lőporgáz–lövedék–légoszlop rendszert le kell egyszerűsíteni a lövésfolyamat teljes tartományában, elnevezve ezt *redukált csőfuratrendszernek*. A redukált rendszer elemei: a csőfurat, a lőpor, a lőporgáz és a lövedék.
4. Nem szükségeszerű, de mindenképpen célszerű kiegészítenünk a redukált csőfuratrendszerünket egy dinamikai lengőrendszerrel, mivel a redukált gázhengerrendszerünk nemcsak a redukált zárszerkezetrendszert fogja gerjesztetni, hanem vissza fog hatni a redukált csőfuratrendszerre is, a fegyvercső hajlítólengését előidézve. A dinamikai lengőrendszer ekkor maga a szerelt fegyvercső. A fegyvercső csillapított szabad lengésének az automatika működésére nincs hatása, viszont a sorozatlövés találati valószínűségére igen. (A nem kellően csillapított csőlengés a fegyver egyébként konstans induló szöghibáját várható érték

nélküli valószínűségi változóvá teszi, ezért automata fegyver esetében a csőlengést ellenőrizni kell.) Ezen megfontolásból felállítjuk a *redukált fegyvercsőrendszert* (2. ábra).

5. Az összekapcsolt alrendszerekre fel kell írunk a (gáz)dinamikai, energetikai, lengéstani egyenleteket, meg kell határozni az összekapcsolódások kezdő-, illetve végpontjait, valamint ahol ez fizikai szempontból szükséges, tovább kell bontani egy-egy kezdő- és végpont közötti részt más-más egyenletrendszerrel leírható tartományokra. Az így összekapcsolt rendszerünket nevezzük el *redukált automata főrendszernek* (9. ábra).

Modellállítás a redukált csőfuratrendszerre

Ballisztikai rendszerünkre vonatkozóan az alábbi főbb megszorításokat tesszük:

- A *lőporgázok* a van der Waals-állapotegyenletnek megfelelően viselkednek.
- A lőporszemcsék égése követi a geometriai égési modellt.
- A lőporszemcsék égése megfelel a lineáris égési törvénynek.
- Csak a *lövedék* lineáris mozgásából származó kinetikus energiát tekintjük főmunkának, minden egyéb munkavégzést másodlagosnak tartunk.
- A másodlagos munkák főmunkához viszonyított aránya állandó a lövésfolyamat során, értékét konstans szorzó (φ) jellemzi.
- A gázutóhatás tartományában a *lőporgázok* áramlását semmi sem korlátozza.
- A rendszer koncentrált paraméterű és valamennyi pontjában azonos termodinamikai és áramlástani állapotok uralkodnak.

Modellállítás a redukált gázhengerrendszerre

Modellünkben a *redukált gázhengerrendszert* a *redukált csőfuratrendszer* ballisztikai alrendszerének tekintjük. Megtáplálása a *gázátömlő furaton* keresztül történik. Rá vonatkozóan az alábbi főbb megszorításokat tesszük:

- A *lőporgázok* a van der Waals-állapotegyenletnek megfelelően viselkednek.
- A *gázhenger* és a *gázdugattyú* tökéletesen illeszkedik, gázvesztesség nincs.
- A *gázhenger* és a *gázdugattyú* szétkapcsolódásakor tranziens jelenségek nem lépnek fel.
- A *gázhenger* merev test.
- A *gázhenger* és a *csőfurat* fajlagoshőcsere-viszonyai azonosak.
- Amennyiben a *gázhengerben* és a *fegyvercsőben* lévő gáznyomás eltérő, úgy a *gázhengerfuraton* át áramló *lőporgázok* kritikus állapotban a kisebb nyomású tér felé haladnak, függetlenül a nyomáskülönbség mértékétől.
- Amennyiben a lepuffanó tartományban a *gázátömlő furat* leeresztőképessége nagyobb, mint a *csőfuraté*, úgy a *redukált gázhengerrendszert* eliminálva annak kezdeti térfogatát közvetlenül a *redukált csőfuratrendszerhez* kapcsoljuk.

- A *gázátömlő furat* térfogatát elhanyagoljuk.
- A *redukált gázhengerrendszer* koncentrált paraméterű, valamennyi pontjában azonos termodinamikai és áramlástan állapotok uralkodnak.

Modellállítás a redukált zárszerkezetrendszerre

Modellünk megalkotásánál vegyük figyelembe azt a tényt, miszerint a *zárszerkezetrendszer* a *redukált gázhengerrendszerrel* csak a *gázdugattyú gázhengerfuratban* tartózkodásának idejében és tartományában van kapcsolatban. Minket részletesen csak a rendszerkapcsolat alatt végbemenő folyamatok érdekelnek, ezért a *zárszerkezetrendszerünket* drasztikusan le tudjuk egyszerűsíteni. De előtte tekintsük át, hogy a vizsgált fegyvernél hogyan is néz ki a tényleges *zárszerkezetrendszer*, amelyet nevezzünk el *szerelt zárszerkezetrendszernek*.

A rendszer alkotóelemei a *szerelt zárkeret*, a *szerelt zárfej*, az *előtt hüvely* és a *helyretoló rugó*. A rendszerkapcsolat ideje alatt (ez zárútban kifejezve 20 mm) az *előtt hüvely* semmilyen, *szerelt zárfej* pedig csak negyed fordulatot forgást végez, jelentéktelen redukált tömeg mellett. A *helyretoló rugónak* a redukált tömege éppen a fele a ténylegesnek, amely elhanyagolhatóan csekély. A nem mozgó *előtt hüvely* hatását kötelező, a *szerelt zárfejt* és a *helyretoló rugót* pedig megengedett figyelmen kívül hagyni. Ezekkel a megfontolásokkal leegyszerűsítve a *szerelt zárszerkezetrendszertől* jutunk el a *redukált zárszerkezetrendszerhez*, amely kizárólag egyetlen komponensből áll, ez pedig a *szerelt zárkeret*.

A *redukált zárszerkezetrendszer* a ballisztikai alrendszerekről történő leválása után egyéb alrendszerekkel kapcsolódik, amelyek befolyásolják mozgását. Ezek a zár hátrahozásának során a *kakas*, a *töltött tár* (a legfelső lőszeren keresztül) és a *szerelt tok* (a hüvelykivetőn, illetve a záró tömbön keresztül), a zár előremozgásának során pedig a *töltött tár* (a legfelső lőszer betöltésén keresztül) és a *szerelt tok* (a csőfarra való ütközésen keresztül). Minden kapcsolódáspont-pár egy-egy tartományra bontja a *szerelt zárszerkezetrendszer* mozgását, úgy energetikai, mint dinamikai szempontból. Modellezésünk során ezen folyamatok részletes leírásától eltekintünk, immár a *redukált zárszerkezetrendszerre* gyakorolt hatásait másodlagos munkaként vesszük figyelembe, és súrlódási erővel közelítjük.

Modellállítás a redukált fegyvercsőrendszerre

A rendszert koncentrált paraméterű, erőgerjesztésű csillapított dinamikai lengőrendszernek vesszük fel. A fegyvercsövet befalazott tartóval modellezzük, a gerjesztés a *redukált gázhengerrendszer* nyomásából származó tiszta hajlítónyomaték, a húzást nem vesszük figyelembe. A fegyvercső tömegét és a gerjesztési pontot a *gázhenger* csatlakozási felezővonalába redukáljuk. A fegyvercsövet inntól zérus tömegűnek tekintjük, rugalmasságát szintén a felezővonalhoz illesztett súlytalan rugóval vesszük figyelembe.

Mivel a felezővonal és a csőszáj közötti csőszakasz terhelésmentes és súlytalan, a rugalmas szál egyenlete egy két részből álló függvény (14. ábra). Az első részét a rugalmas szál differenciálegyenletéből számítjuk ki, a második pedig az első rész kapcsolódási végpontjából húzott érintő egyenes lesz. A rugalmas szál egyenletét minden számított időpillanatban megoldjuk, és transzformáljuk a kapott lengésjellemzőket a csőszájra, így határozva meg annak mozgását.

Modellállítás a redukált automatika főrendszerre

Egy megszorítást teszünk: a rendszerkapcsolatok végállapotában (a tartományok határain) tranziens jelenségek nem lépnek fel.

A tartományok leírása és határai

Egy lövésfolyamat egymástól jól elhatárolható tartományokra osztható a bennük lejátszódó eltérő jelenségek, gázdinamikai folyamatok mentén. Nézzük ezeket a tipikus szakaszokat rendre a lövésfolyamat kezdetétől a végéig valamely hagyományos, hosszú csövű fegyver esetében, *normál üzemállapot* mellett.

1. tartomány: A lőportöltet begyulladásától a *lövedék* megindulásáig tart, expanzió és munkavégzés nélkül. A tartományban csak a *redukált csőfuratrendszer* érintett.

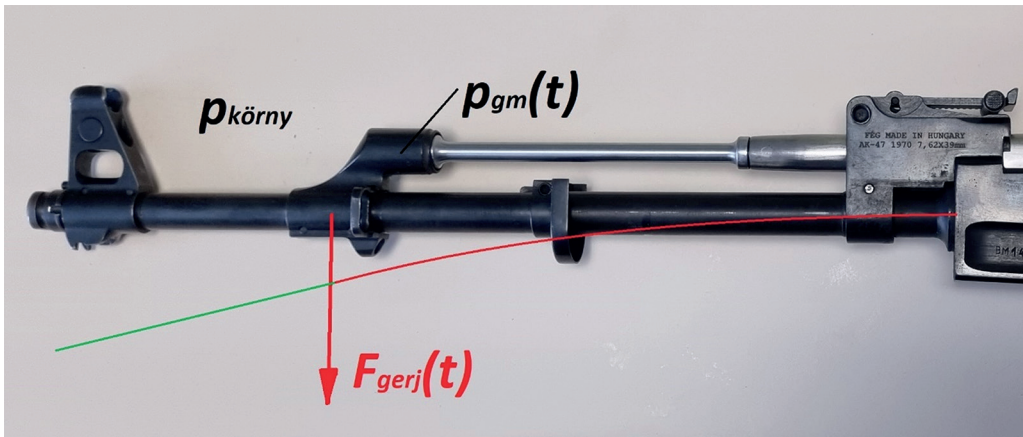
2. tartomány: A *lövedék* megindulásától a lőportöltet elégséig tart. A tartományban csak a *redukált csőfuratrendszer* érintett.

Normál üzemállapot esetén ebben a szakaszban alakul ki a maximális gáznyomás, a lövedéksebesség eléri torkolati sebességének 70–80%-át. A gázelvételi megcsapolási pont szinte mindig ez után a szakasz után következik, ugyanis itt a legnagyobbak a nyomásértékek, valamint a nyomásgradiens és a nyomásmaximum is itt alakul ki. Belátható, hogy a lőszerelemek szórásából, valamint a lőporhőmérséklet változásából adódó hatások a nyomásgörbét nyújtják/zsugorítják és az abszcisszatengely (az idő vagy a lövedékút tengelye) mentén jobbra vagy balra tolják a tervezési görbéhez képest. A bizonytalansági összetevők száma ebben a szakaszban a legnagyobb, és azok hatásai is itt a legjelentősebbek, mivel a nyomásgradiens és a nyomásérték is a legnagyobb. A bizonytalansági összetevők miatt ebben a szakaszban a *gázmotor* jelentős munkamennyiség-szórással fog üzemelni, mindamelllett, hogy az elégetlen lőporszemcsék hatására az kokszolódásra is hajlamosabb lesz.

3. tartomány: A lőportöltet elégsétől a *gázátömlő furatig* tart. Dinamikus, forrásmentes politropikus tartomány. A tartományban csak a *redukált csőfuratrendszer* érintett.

4. tartomány: A *gázátömlő furattól a gázmotor feltöltődéséig* tart. Dinamikus, kvázi forrásmentes politropikus tartomány. A szakaszban valamennyi alrendszer, azaz a *redukált csőfuratrendszer*, a *redukált gázhengerrendszer*, a *redukált zárszerkezetrendszer* és a *redukált fegyvercsőrendszer* is érintett.

A négy alrendszer ebben a szakaszban összekapcsolt állapotban van, az összeköttetést a *gázátömlő furat*, a *gázhengerfurat*, a *gázdugattyú*, valamint a *gázhenger felerősítése* biztosítja. A gáz a *csőfuratból* a *gázhenger* irányába áramlik, mindvégig a *csőfuratban* lévő gáz pillanatnyi intenzív állapotjelzőivel meghatározott kritikus jellemzőkkel, a *redukált zárszerkezetrendszer* pedig a *gázdugattyú* közvetítésével hátrafelé kezd mozogni, növelve ezzel a *gázhenger* térfogatát. A *gázhenger* a csőszáj irányába húzza a *fegyvercsövet*, ezzel hajlítónyomatékot ad a felrögzítésének középvonala mentén. (A jelenség okát a 6. ábra szemlélteti.)



6. ábra: A gázhenger hatására kialakuló hajlítólengés. A semleges szál egy deformált (piros) és egy terheletlen egyenes (zöld) részből áll.

Forrás: a szerző felvétele

5. tartomány: A *gázmotor* feltöltődésétől a csőszájig tart. Dinamikus, forrásmentes politropikus szakasz, valós ballisztikai alrendszer nélkül.

A négy alrendszer ebben a szakaszban is összekapcsolt állapotban van, az összeköttetés az előző pont szerinti. A gáz a *gázhengerből* a *csőfurat* irányába áramlik, közel egyensúlyi feltételek mellett. Kritikus állapot nem alakul ki, mivel a *csőfuratban* lévő gáz nyomásváltozási sebessége kicsi. A *gázhenger* a *csőfurat* kiterjesztett részének tekinthető, az ott uralkodó intenzív állapotjelzőket azonosnak vesszük a *csőfuratban* lévőekkel.

6/a. tartomány: A csőszájtól a *gázmotor* lepuffanásáig tart. Dinamikus, forrásos politropikus szakasz, mind a négy alrendszerrel.

A *gázmotor* kamranyomása ebben a szakaszban lassabban csökken, mint a csőnyomás. A kis keresztmetszetű *gázhengerfurat* miatt a *gázhengerben* a nyomásváltozási sebesség kisebb lesz, mint a *csőfuratban* lévő, ezért a *gázmotor* pufferként viselkedik. (Modellünk

szerint most is igaz, hogy a *gázmotor* lepuffanása során végig kritikus állapotban áramlik a gáz a *csőfuratba*.) A csőfuratot a *lövedék* már elhagyta, *normál üzemállapotú rendszerek* esetében ez a szakasz rendeltetésszerűen nem következhet be. Ez a tartomány akkor jelenik meg, ha a *gázhengerfurat* keresztmetszete az elkokszolódás miatt jelentősen leszűkül. (Ez a leszűkülő átmérő az AMMSZ gépkarabély esetében elméletileg 0,2 mm, de ekkor már a résveszteségek hatásától nem lehet eltekinteni.)

Van példa arra, hogy a *gázmotort* szándékosan úgy tervezik, hogy annak feltöltődése után a nagy átmérőjű *gázátömlő furat* lezárjon, így a visszaömlés az illesztési réseken lesz lehetséges. Ekkor a *gázmotor* ballisztikai szempontból pufferként viselkedik. Ilyen konstrukciós kialakítású a T32-es német 20 mm-es gépágyú *gázmotorja*.⁸

6/b. tartomány: A csőszájtól a *gázmotor* és a *csőfurat* egyidejű lepuffanásáig tart. Dinamikus, forrásos politropikus szakasz, mind a négy alrendszerrel, de valós ballisztikai alrendszer nélkül.

A két ballisztikai alrendszer viselkedése megegyezik az 5. tartományban ismertetettel, azzal a kivétellel, hogy rendszerünket a *lövedék* már elhagyta. *Normál üzemállapotú rendszerek* rendeltetésszerű működését ez a tartomány jellemzi.

7. tartomány: A *csőfurat* lepuffanásától a *zár* felütkezéséig tart. A szakaszban a *redukált zárszerkezetrendszer*, valamint a *redukált fegyvercsőrendszer* érintett.

A belső ballisztikai folyamatok véget érésével a *szerelt zárkeret* csillapított hátramozgást, a *redukált fegyvercsőrendszer* pedig (a gerjesztés megszűntével) csillapított szabad lengést végez.

8. tartomány: A *zár* hátsó pozícióból való megindulásától a *zár* csőfaron történő felütkezéséig tart. A szakaszban a *redukált zárszerkezetrendszer*, valamint a *redukált fegyvercsőrendszer* érintett.

A *zár* előremozog a zárótömből való visszapattanás impulzusával (ha ez nem nulla), valamint a helyretoló rugó rásegítésével, miközben a *redukált fegyvercsőrendszer* csillapított szabad lengést végez.

9. tartomány: A *zár* csőfaron való felütkezésétől a *redukált fegyvercsőrendszer* csillapított lengőmozgásának megszűntéig tart. A szakaszban a *redukált fegyvercsőrendszer* érintett.

A *zár* a mozgását befejezve a csőfaron nyugszik, a *redukált fegyvercsőrendszer* pedig csillapított szabad lengést végez.

⁸ CHINN 1951: Vol. 3. 19–20.

Az 1. tartomány egyenletei

A felírható egyenletek a következők:

$$\frac{d}{dt} \omega(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Omega_0}{\omega_0} \cdot \rho_{lp} \cdot (a_3 e(t)^3 + a_2 e(t)^2 + a_1 e(t)) \right), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\rho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)} \right), \quad (3)$$

ahol:

Ω_0 a betöltött lőportöltet tömege, mértékegysége: kg;

ω_0 egy darab lőporszemcse tömege, mértékegysége: kg;

a_1, a_2, a_3 a lőporszemcse térfogatfüggvényének együtthatói, mértékegységeik: m^2, m ,
egység;

f a lőporgázok fajlagos belső energiája,⁹ mértékegysége: $\frac{J}{kg}$;

u_1 a lőpor 1 bar nyomáson vett égési sebessége, mértékegysége: $\frac{m}{s \cdot 10^5 \cdot Pa}$;

ρ_{lp} a lőpor sűrűsége, mértékegysége: $\frac{kg}{m^3}$;

α a lőporgázok kovolumene (saját tömör térfogata), mértékegysége: $\frac{m^3}{kg}$;

W_0 a hüvely szabad térfogata lőportöltet nélkül, mértékegysége: m^3 ;

$\omega(t)$ az elégett lőportömeg függvénye, mértékegysége: kg;

$e(t)$ a leégett lőporréteg vastagságának függvénye, mértékegysége: m;

$p(t)$ a lőporgáznyomás-függvény, mértékegysége: Pa.

A 2. tartomány egyenletei

Felírható az (1) és a (2) főegyenlet.

⁹ Ez a fajlagos energia mérésekkel határozható meg, értéke a ballisztikai bomba fali hőveszteségeit is figyelembe veszi, ezért a force-érték mindig kisebb, mint az alsó fűtőérték. A lőpor egyik legfontosabb jellemzője.

A tartomány további főegyenletei a nyomásra, a lövedéksebességre, valamint a lövedékútra:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\rho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)} \right), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cső} \cdot (p(t) - p_{din}(t)) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad (6)$$

Továbbá megadható a:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\omega(t)}{W_0 - \alpha \cdot \omega(t) - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\rho_{lp}} + A_{cső} \cdot l(t)}, \quad (7)$$

$$p_{din}(t) = \frac{\rho_{gáz}(t) \cdot v(t)^2}{2} \quad (8)$$

segédegyenlet, ahol:

- κ a *lőporgázok* fajhőviszonya, mértékegysége: egység;
- φ a másodlagos munkák együtthatója, mértékegysége: egység;
- $A_{cső}$ a fegyvercső belső keresztmetszeti területe, mértékegysége: m²;
- F_s a *csőfurat* és a *lövedék* közötti súrlódóerő, mértékegysége: N;
- $v(t)$ a lövedéksebesség-függvény, mértékegysége: $\frac{m}{s}$;
- $l(t)$ a lövedékút-függvény, mértékegysége: m;
- $p_{din}(t)$ az áramló *lőporgázok* dinamikusnyomás-függvénye, mértékegysége: Pa;
- $\rho_{gáz}(t)$ a lőporgázsűrűség-függvény, mértékegysége: $\frac{kg}{m^3}$.

A 3. tartomány egyenletei

Felírható az (5) és a (6) főegyenlet, valamint a (8) segédegyenlet.

A gáznyomásra írható, hogy:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot \Omega_0 - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \alpha \cdot \Omega_0 + A_{cső} \cdot l(t)} \right), \quad (9)$$

valamint a gázsűrűség segédegyenlete:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_0}{W_0 - \alpha \cdot \Omega_0 + A_{cső} \cdot l(t)}. \quad (10)$$

A 4. tartomány egyenletei

Felírható az (5) és a (6) főegyenlet, valamint a (8) segédegyenlet.

A gázmotorban lévő löporgázok energiájára írható, hogy:

$$E_{gm}(t) = f \cdot m_{gáz_gm}(t) - \frac{m_{gáz_gm}(t)}{\Omega_0} \cdot \left(\frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 \right),^{10} \quad (11)$$

rendezve:

$$E_{gm}(t) = m_{gáz_gm}(t) \left(f - \frac{(\kappa - 1)}{2 \cdot \Omega_0} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 \right). \quad (12)$$

A tartomány további főegyenletei:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot (\Omega_0 - m_{gáz_gm}(t)) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \alpha \cdot (\Omega_0 - m_{gáz_gm}(t)) + A_{cső} \cdot l(t)} \right), \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2}{W_{gm} - \alpha \cdot m_{gáz_gm}(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right), \quad (14)$$

¹⁰ A (11) egyenlet jobb oldalának második tagja az átáramló gázok lecsökkent energiatartalmát hivatott reprezentálni. A csökkenés a lövedék felgyorsítására fordított energiamennyiség. Ebből következőleg az egyenlet jobb oldali második tagja valójában egy integrálegyenlet, amelyet függvénnnyel váltunk ki, az egyszerűbb kezelhetőség végett.

$$\frac{d}{dt} m_{gáz_gm}(t) = \eta_{gm} \cdot A_{krit_gm} \cdot \rho_{krit}(t) \cdot a_{krit}(t), \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}}, \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} l_{zár}(t) = v_{zár}(t), \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} v_{gm}(t) = \frac{F_{gerj}(t) - k_{rug} \cdot l_{gm}(t) - c_v \cdot v_{gm}(t)}{m_{red}}, \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} l_{gm}(t) = v_{gm}(t). \quad (19)$$

A további segédegyenletek:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_0 - m_{gáz_gm}(t)}{W_0 - \alpha \cdot (\Omega_0 - m_{gáz_gm}(t)) + A_{cső} \cdot l(t)}, \quad (20)$$

$$\rho_{krit}(t) = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\left(\frac{1}{\kappa + 1} \right)} \cdot \rho_{gáz}(t), \quad (21)$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t) \cdot \frac{2}{\kappa + 1}}{\rho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}}, \quad (22)$$

$$a_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \quad (23)$$

$$F_{gerj}(t) = A_{gm} \cdot p_{gm}(t) \cdot mult_{F_gerj}. \quad (24)$$

Jelölések:

- $v_{gm}(t)$ a gázmotor felerősítésének felezőegyesénél a *fegyvercső* függőleges sebessége, mértékegysége: $\frac{m}{s}$;
- $l_{gm}(t)$ a gázmotor felerősítésének felezőegyesénél a *fegyvercső* függőleges elmozdulása, mértékegysége: m;
- $F_{gerj}(t)$ a modell rugóját közvetlenül terhelő gerjesztőerő függvénye, mértékegysége: N;

$mult_{F_{gerj}}$	a <i>gázhenger</i> nyomásából származó erő függvényének szorzója a gerjesztőerőre nézve, mértékegysége: egység;
$krug$	a <i>fegyvercső</i> egyenértékű rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{N}{m}$;
c_v	a viszkózus csillapítási tényező, mértékegysége: $\frac{N \cdot s}{m}$;
m_{red}	a <i>fegyvercső</i> – a gázmotor felerősítésének felezőegyenese távolságára – redukált tömege, mértékegysége: kg;
W_{gm}	a <i>gázhenger</i> kezdeti szabad térfogata, mértékegysége: m^3 . (A <i>gázhenger</i> kezdeti szabad térfogata – holttere – a <i>gázdugattyú</i> homloksíkjával határolt <i>gázhengerfurat</i> térfogata, zárolt fegyveren értelmezve);
A_{gm}	a <i>gázhengerfurat</i> keresztmetszeti területe, mértékegysége: m^2 ;
$\varphi_{zár}$	a zárra vonatkozó másodlagos munkák koefficiense, mértékegysége: egység;
$m_{zár}$	a zár tömege, mértékegysége: kg;
F_r	a helyretoló rugó zárolási pozícióban kifejtett ereje, mértékegysége: N;
c_r	a helyretoló rugó rugóállandója, mértékegysége: $\frac{m}{N}$;
$F_{s_zár}$	a zár és a tok közötti súrlódóerő, mértékegysége: N;
A_{krit_gm}	a <i>gázhengerfurat</i> keresztmetszeti területe, mértékegysége: m ;
η_{gm}	a <i>gázhengerfurat</i> irreverzibilitásait figyelembe vevő tényező, ¹¹ mértékegysége: egység;
R_{spec}	a löporgáz specifikus gázállandója, mértékegysége: $\frac{kg}{m^3}$;
$p_{gm}(t)$	a gázmotornyomás-függvény, mértékegysége: Pa;
$m_{gáz_gm}(t)$	a <i>gázmotorba</i> áramló löporgáz tömegének függvénye, mértékegysége: kg;
$E_{gm}(t)$	a <i>gázmotor</i> energiafüggvénye, mértékegysége: J;
$\rho_{krit}(t)$	a <i>csőfuratban</i> lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázsűrűség-függvény, mértékegysége: $\frac{kg}{m^3}$;
$T_{krit}(t)$	a <i>csőfuratban</i> lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázhőmérséklet-függvény, mértékegysége: K;
$a_{krit}(t)$	a <i>csőfuratban</i> lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázhangsebesség-függvény, mértékegysége: $\frac{m}{s}$;
$v_{zár}(t)$	a zársebességfüggvény, mértékegysége: $\frac{m}{s}$;
$l_{zár}(t)$	a zárútfüggvény, mértékegysége: m.

¹¹ KIRILLOV 1973: 407–431. foglalkozik gázmotorok számításaival, és ad ajánlásokat meghatározására. A fűvókahatásfokot az elméleti áramlási keresztmetszet kontrakciós tényezőjeként kell értelmezni. Az átömlő gázok irányváltoztatása miatt kialakuló áramlási holtterek az áramlási keresztmetszetet csökkentik.

Az 5. tartomány egyenletei

Felírható az (5), a (6), a (16), a (17), a (18) és a (19) főegyenlet, valamint a (8) segédegyenlet.

Megadhatók továbbá a:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot \Omega_0 - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)}{W_0 + W_{gm} - \alpha \cdot \Omega_0 + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right), \quad (25)$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p(t) - c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s_{zár}}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} \quad (26)$$

főegyenletek, valamint segédegyenletekként a:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_0}{W_0 + W_{gm} - \alpha \cdot \Omega_0 + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}, \quad (27)$$

$$F_{gerj}(t) = A_{gm} \cdot p(t) \cdot mult_{F_{gerj}}. \quad (28)$$

A 6/a. tartomány egyenletei – kis keresztmetszetű gázhengerfuratnál

Felírható a (16), a (17), a (18) és a (19) főegyenlet, valamint a (21), a (22), a (23) és a (24) segédegyenlet.

A gázmotorban lévő löporgázok energiájára írható, hogy:

$$\begin{aligned} E_{gm}(t) = & \\ = f \cdot \left(\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t) \right) - \frac{\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t)}{\Omega_0} & \\ \cdot \left(\frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 \right), & \end{aligned} \quad (29)$$

rendezve:

$$E_{gm}(t) = \left(\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t) \right) \left(f - \frac{(\kappa - 1)}{2 \cdot \Omega_0} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 \right). \quad (30)$$

A tartomány további főegyenletei:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}p(t) = \\ = \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot (\Omega_{cső_56sz} + m_{gaz_gm}(t) - m_{gáz}(t)) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot (\Omega_{cső_56sz} + m_{gáz_gm}(t) - m_{gáz}(t))} \right), \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}p_{gm}(t) = \\ = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2}{W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz}(t) = \eta_{csőszáj} \cdot A_{cső} \cdot \rho_{krit}(t) \cdot a_{krit}(t), \quad (33)$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz_gm}(t) = \eta_{gm} \cdot A_{krit_gm} \cdot \rho_{krit_gm}(t) \cdot a_{krit_gm}(t). \quad (34)$$

A további segédegyenletek:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_{cső_56sz} + m_{gáz_gm}(t) - m_{gáz}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot (\Omega_{cső_56sz} + m_{gáz_gm}(t) - m_{gáz}(t))}, \quad (35)$$

$$\rho_{gáz_gm}(t) = \frac{\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t)}{W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{gm_56sz} - m_{gáz_gm}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}, \quad (36)$$

$$\rho_{krit_gm}(t) = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\left(\frac{1}{\kappa + 1} \right)} \cdot \rho_{gáz_gm}(t), \quad (37)$$

$$T_{krit_gm}(t) = \frac{p_{gm}(t) \cdot \frac{2}{\kappa + 1}}{\rho_{gáz_gm}(t) \cdot R_{spec}}, \quad (38)$$

$$a_{krit_gm}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit_gm}(t)}. \quad (39)$$

Jelölések:

- $\Omega_{cső_56sz}$ az 5. tartomány végpillanatában a *csőfuratban* lévő löporgáztömeg, mértékegysége: kg;
- Ω_{gm_56sz} az 5. tartomány végpillanatában a *gázhengerben* lévő löporgáztömeg, mértékegysége: kg;
- v_0 a csőtorkolatból kilépő *lövedék* sebessége, mértékegysége: $\frac{m}{s}$;
- $m_{gáz}(t)$ a *csőfuratból* a környezetbe áramló löporgáztömeg függvénye, mértékegysége: kg;
- $\eta_{csőszáj}(t)$ a csőszáj irreverzibilitásait figyelembe vevő tényező,¹² mértékegysége: egység;
- $\rho_{krit_gm}(t)$ a *gázmotorban* lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázsűrűség-függvény, mértékegysége: $\frac{kg}{m^3}$;
- $T_{krit_gm}(t)$ a *gázmotorban* lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázhőmérséklet-függvény, mértékegysége: K;
- $a_{krit_gm}(t)$ a *gázmotorban* lévő gáz kritikus állapotához tartozó löporgázhangsebesség-függvény, mértékegysége: $\frac{m}{s}$.

A 6/b. tartomány egyenletei – nagy keresztmetszetű gázhengerfurnatnál

Felírható a (17), a (18), a (19), a (26) és a (33) főegyenlet, valamint a (21), a (22), a (23) és a (28) segédegyenlet.

Megadhatjuk továbbá a:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}p(t) &= \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot (\Omega_0 - m_{gáz}(t)) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)}{W_0 + W_{cső} + W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_0 - m_{gáz}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right) \end{aligned} \quad (40)$$

főegyenletet és a:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_{cső} - m_{gáz}(t)}{W_0 + W_{cső} + W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{cső} - m_{gáz}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \quad (41)$$

segédegyenletet.

¹² Hasonló a gázfurat hatásfokához, de itt nincs irányváltozása a kiömlő gázoknak. Értékét inkább „igazságszámot” kell tekinteni, a növekvő hőcsere miatt csökkenő hangsebességértéket hivatott figyelembe venni. Helyes megválasztásával a szimulációs nyomáslefutás-görbét lehet a ballisztikai mérések piezo-elektromos gáznyomásmérési eredményeihez közelíteni.

A 7. tartomány egyenletei

Felírható a (17) és a (19) főegyenlet.

A tartomány további főegyenletei:

$$\frac{d}{dt} v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}}, \quad (42)$$

$$\frac{d}{dt} v_{gm}(t) = -\frac{k_{rug} \cdot l_{gm}(t) + c_v \cdot v_{gm}(t)}{m_{red}}. \quad (43)$$

A 8. tartomány egyenletei

Felírható a (17), a (19) és a (43) főegyenlet.

A tartomány negyedik főegyenlete:

$$\frac{d}{dt} v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r + F_{s_zár_em}}{\varphi_{zár_em} \cdot m_{zár}}, \quad (44)$$

ahol:

$\varphi_{zár_em}$ a zár előremozgásakor értelmezett másodlagos munka együtthatója, mértékegysége: egység;

$F_{s_zár_em}$ a zár előremozgásakor értelmezett súrlódóerő, mértékegysége: N.

A 9. tartomány egyenletei

A tartomány egyenletei a (19) és a (43) főegyenlet.

A szimulációs eredmények és kezelésük

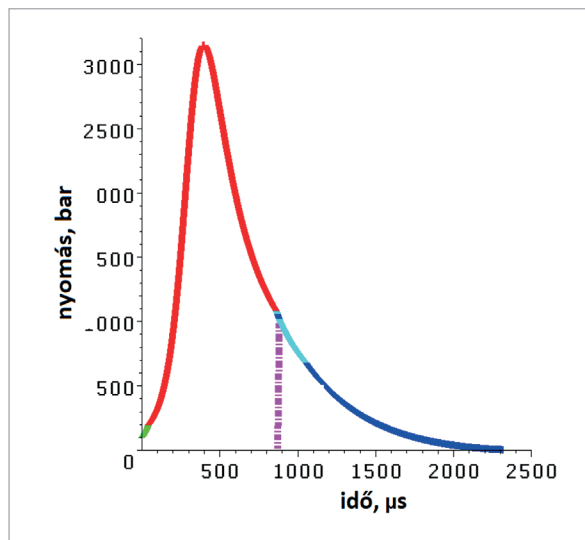
A tartományok egyenletrendszeit numerikus módszerrel oldhatjuk meg. Az eredmények a független időváltozó és a főegyenletek deriváltfüggvényeinek integrálértékei, értékpárosok formájában. Ezeket az értékpárosokat – tartományonként eltérő színezéssel – grafikonon is ábrázolhatjuk.

Eredmények gyári állapotú fegyverre

Számításainkat első lépésben gyári állapotú fegyverre végeztük, a mérési eredményeket segítségül hívva a paraméterek beállításához. Nulladik iterációs lépésben a 43M lőszer VUFL lőporának jellemzőit vettük alapul. A belballisztikai rendszer paramétereit úgy állítottuk be, hogy a szimuláció a vizsgálatok során felhasznált lőszer torkolati sebességét és maximális gáznyomását adja vissza.

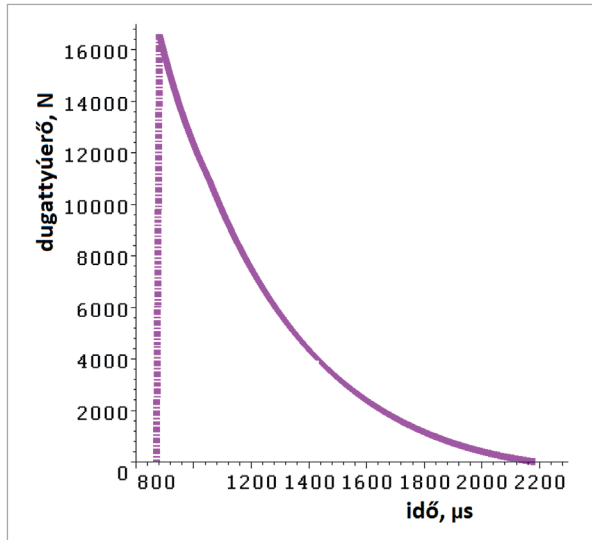
Iterációs lépéseken keresztül a VUFL lőpor gyári geometriai és egyéb paramétereit úgy módosítottuk, hogy a szimulált maximális zársebességérték 1%-os relatív hiba mellett azonos legyen a mérési adatokból extrapolált értékkel, a gáznyomás maximuma és a kezdősebesség változatlansága esetén. Ehhez a feladatunk mindössze annyi volt, hogy megkeressük a legnagyobb zársebességértékkel rendelkező sebesség-idő párost, amellyel a relatív hiba már számítható volt.

A szimulációs számításokat a gyári állapotú 3,3 mm-es (az előzőekben tárgyalt „nagy keresztmetszetű gázátömlő furatként” viselkedő) gázátömlő furatra végeztük. A gázmotor belsejében kialakuló nyomás függvényét a 7. ábra, a nyomásból származó, a gázdugattyúra ható erő függvényét pedig a 8. ábra szemlélteti.



7. ábra: Egyesített nyomás-idő diagram gyári állapotú fegyvernél

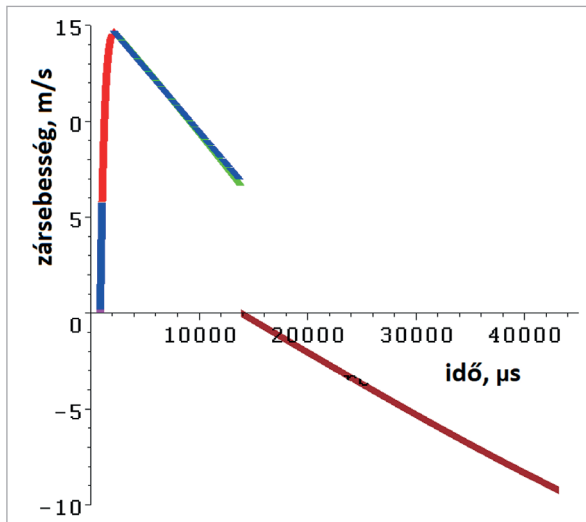
Forrás: a szerző szerkesztése



8. ábra: A gázdugattyúra ható erő diagramja gyári állapotú fegyvernél

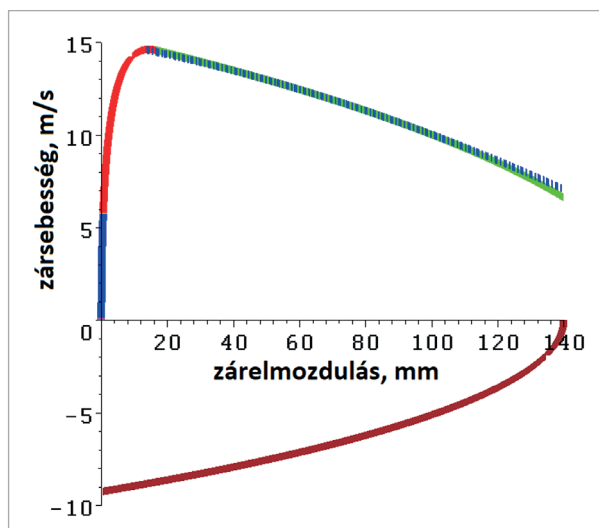
Forrás: a szerző szerkesztése

A zársebesség maximális értéke a mérések alapján 14,63 m/s. A zársebességet a 9. ábra az idő, a 10. ábra pedig a zárelmozdulás függvényében szemlélteti. (A mérési eredményekből számított zársebesség mindkét grafikonon szaggatott kék görbe, amely jól fedti a szimulált zöld görbét.)



9. ábra: Egyesített zársebesség-idő diagram

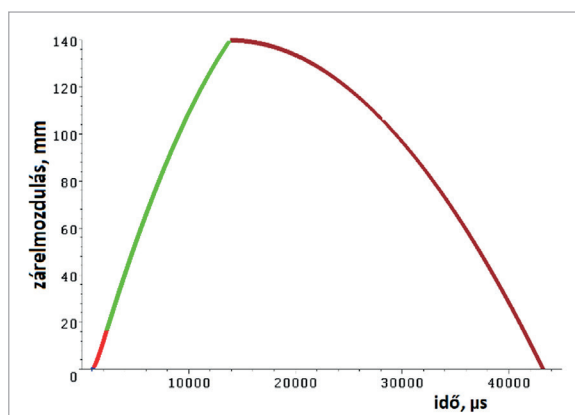
Forrás: a szerző szerkesztése



10. ábra: Egyesített zárbesség-zárelmozdulás diagram

Forrás: a szerző szerkesztése

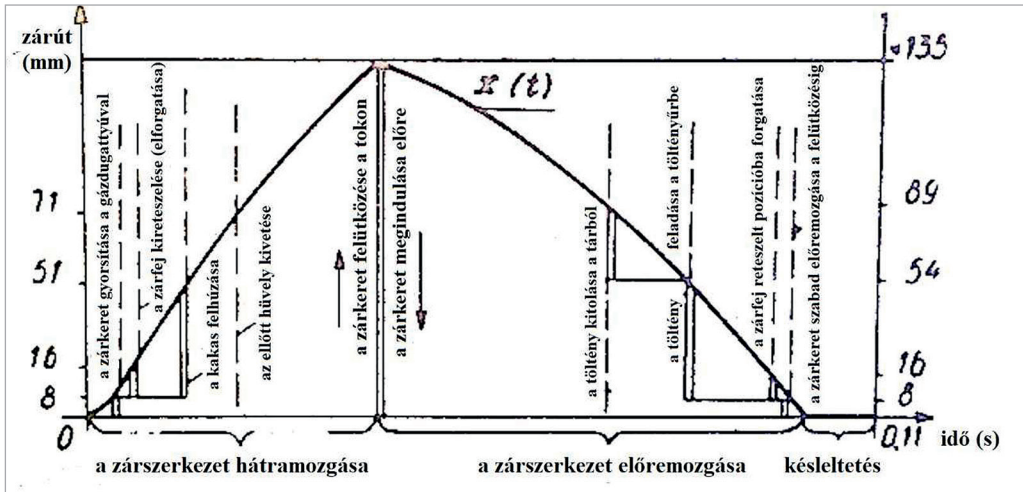
A 11. ábra a vizsgált AMMSZ gépkarabély számított zárelmozdulás-idő függvényét mutatja, míg a 12. ábra Kirillov könyvében¹³ közölt diagram egy AKM típusú gépkarabély zármozgásáról.



11. ábra: Az AMMSZ gépkarabély egyesített zárelmozdulás-idő diagramja

Forrás: a szerző szerkesztése

¹³ KIRILLOV 1973: 43.



12. ábra: Az AKM gépkarabély egyesített zárelmozdulás-idő diagramja¹⁴

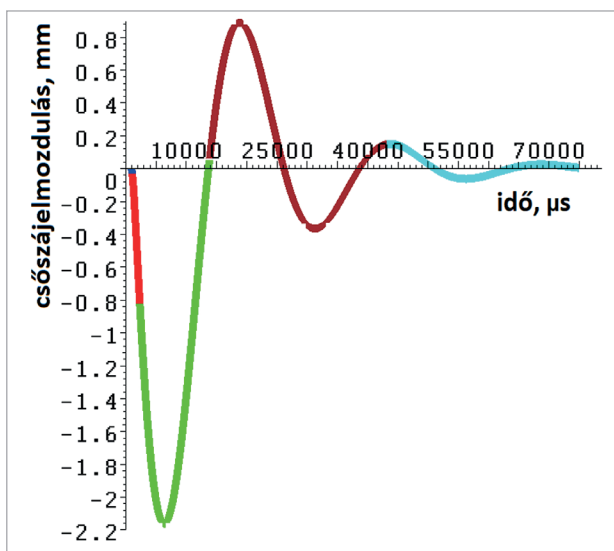
Forrás: KIRILLOV 1973: 43.

Lengési eredmények gyári állapotú fegyverre

Mivel a fegyvercső csillapított szabad lengést végez, ezért lengési jelenségei a lövés-folyamat végére lecsillapodnak (13. ábra). (A viszkózus csillapítási tényező szimuláció során alkalmazott értékét a videófelvételek alapján állapítottuk meg.)

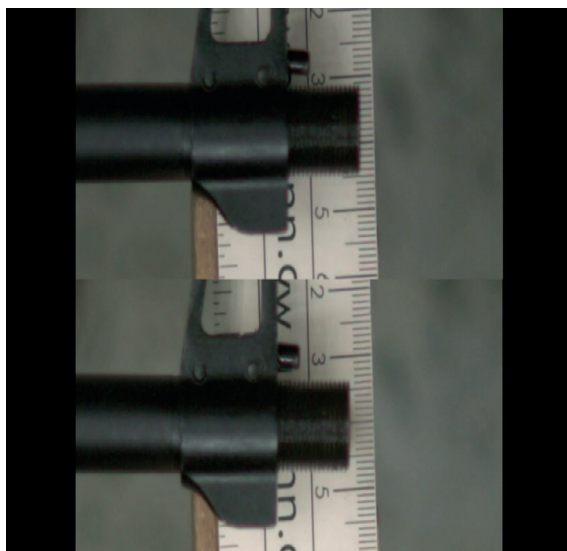
A 14. ábra a csőszáj nyugalmi és a lengés első maximális kitérésű helyzetét mutatja. Megállapítható, hogy a gázmotorral gerjesztett fegyvercső lengése nem elhanyagolható, hozzávetőlegesen 2 mm-es maximális amplitúdóval rendelkezik. Amennyiben a rendszert kiegészítenénk valamely aszimmetrikus terhelést adó csőszájszerelvénnyel, például kompenzátorral, úgy ez a lengés lényegesen nagyobb kitérésű lenne, és hosszabb ideig tartana. (Az AMMSZ gépkarabély esetében a gyári kompenzátor használatával mintegy 8 mm-es kitérést mérhetünk.)

¹⁴ A forrás a szovjet gépkarabélyokra nézve az egyik hitelesnek minősíthető mű. Összehasonlításképpen marad az ábra eredeti formájában, a szimulációs számítások egyezőségét igazolandóan.



13. ábra: A csőszáj lengésképe (függőleges irány)

Forrás: a szerző szerkesztése



14. ábra: A csőszáj nyugalmi helyzetének, valamint első maximális kitérésének képe

Forrás: a szerző felvétele

Belátható, hogy túl gyors tűzütem esetén ez a lengés a lövésfolyamat végén nem csillapodik le, ezért a sorozatlövés találati valószínűsége erősen romlani fog. (A kompenzátor használata tovább növeli a lecsillapodási időt, ezért a gyári szerelvények lecserélése mindig megfontolandó.)

Kiszámítottuk az induló szöghiba¹⁵ szimulációs értékét is, amely -3 szögperc lett. A fegyver szakutasításában -2 szögperc található, amely az alkalmazott koncentrált paraméterű modellt figyelembe véve megfelelő közelítés. (Az induló szöghiba ezeknél a konstrukciónál döntő részben annak a jelenségnek a következménye, hogy a *gázmotor* már a *lövedék* csőfuratban tartózkodása alatt hajlítólengésre kényszeríti a *fegyvercsövet*, ezért a *lövedék* már egy meghajlított *csőfuratból* lép ki, így az eredeti lőszög némileg megváltozik.)

Eredmények leszűkült gázátömlő furatú fegyverre

Elvégeztük a számításokat leszűkült *gázátömlő furatokra* is, mivel ez az egyetlen olyan paramétere a fegyvernek, amely valós körülmények között változni tud. (A keresztmetszet csökkenése a *lőporgázokban* lévő szilárd összetevők lerakódása miatt következik be, amely a hanyag karbantartásra és/vagy a gyenge minőségű lőporra vezethető vissza.)

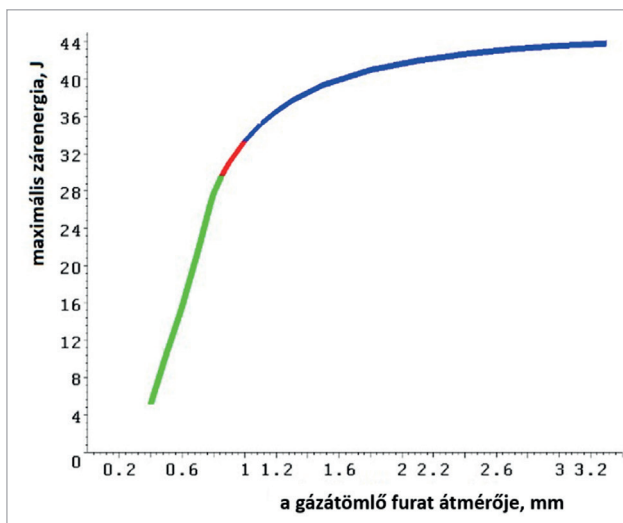
A gázmotor a lövedék kilépése előtt feltöltődik

A szimulációs futtatásoknál a *gázátömlő furat* átmérőjét adott értékekkel csökkentettük, a számításokat a *szerezelt zárkeret* zérus sebességéig végezve. A *szerezelt zárkeret* megállása annak felütközéséből vagy a zárúton belüli megállásából adódott. A futtatások eredményeit – maximális zárenergia a *gázátömlő furat* átmérőjének függvényében – a 15. ábra szemlélteti.

Ezen az ábrán látható, hogy a jelentősnek mondható, 60%-os keresztmetszet-szűkülés (körülbelül 2 mm furatátmérő) esetén a fegyver még teljesen üzembiztosan fog működni. Ebből nem szükségszerű levonni azt a következtetést, hogy nem kell karbantartani, azonban a *gázátömlő furat* erős túlméretezése az üzembiztonságot jelentős mértékben növeli, és a fegyverre (szilárdságtani és dinamikai szempontból) gyakorlatilag nincs hatása.

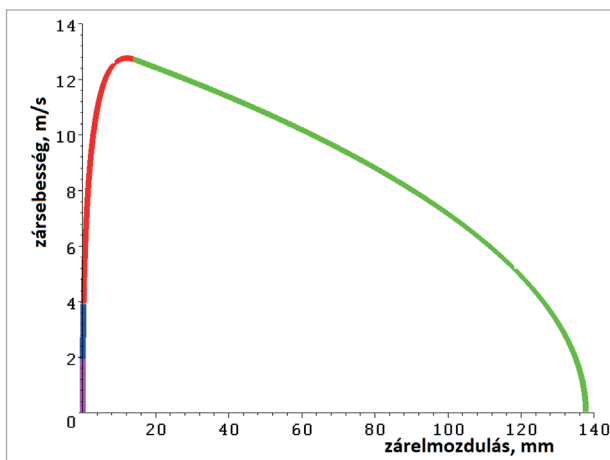
A zár felütközési energiája zérusra csökken 1 mm-re leszűkült átmérő esetében. Ekkor a *gázhenger* feltöltődése 337 mm-es lövedékútnál következik be, ez a 15. ábra sötétkék és piros szakaszainak találkozási pontja. Amennyiben 0,85 mm alá szűkül az átmérő, úgy a *gázmotor* már nem tud feltöltődni a *lövedék* csőben való tartózkodása alatt, ezt az állapotot a 15. ábra piros és zöld szakasza szemlélteti. Az 1 mm-es furat egyesített zársebesség-zárút görbáját a 16. ábra mutatja.

¹⁵ Induló szöghiba alatt azt a ψ szögeltérést értjük, amelyet a merev fegyvercső csőfuratának a geometriai hossz tengelye zár be az átmeneti zónát elhagyó lövedék tényleges impulzusvektorának a csőszájra zavaró hatások nélkül visszaszámított virtuális impulzusvektorával.



15. ábra: A legnagyobb zárenergia grafikonja a gázátömlő furat átmérőjének függvényében

Forrás: a szerző szerkesztése



16. ábra: A zásebesség-zárelmozdulás diagram 1 mm-re szűkült gázátömlő furatnál

Forrás: a szerző szerkesztése

Szűkítsük tovább az átömlő keresztmetszetét, és nézzük, milyen új szakaszokkal, jelenségekkel, egyenletekkel fogunk találkozni.

A gázmotor a lövedék kilépéséig részben töltődik fel – a gázátömlő furat „nagy keresztmetszetű gázátömlő furatként” viselkedik

Ebben a valós esetben a *gázátömlő furat* átmérőjétől eltekintve a fegyver minden paramétere változatlan. (A megváltozó tartományok, a könnyebb áttekinthetőség érdekében * jelölést kapnak.)

Változik a 4. tartomány peremfeltétele, azaz a felírható egyenletek változatlanok, viszont a feltöltődés nem a nyomáskiegyenlítődéssig, hanem a *lövedék* kilépéséig fog tartani, részleges kiegyenlítődéssel a szakasz végén.

Ebből következően a teljes kiegyenlítődéssig (mivel a *csőfurat* nyomása nagyobb) az 5*. tartományban fog bekövetkezni, amely a *csőfurat* és a *gázhenger* teljes nyomáskiegyenlítődéssig fog tartani.

A 6*. tartomány majdnem azonos lesz az előzőekben ismertetett, „nagy keresztmetszetű *gázátömlő furattal*” jellemzett 6. tartománnyal. A különbség annyi, hogy a kezdeti értéként szereplő, a rendszerben lévő gázmennyiség az 5*. tartományban megszököttel kevesebb lesz.

Mindezek alapján a felírható egyenletek a megváltozott szakaszokban a következők lesznek.

Az 5. tartomány egyenletei*

Felírható a (15), a (16), a (17), a (18) és a (19) főegyenlet, valamint a (21), a (22) és a (23) segédegyenlet.

A gázmotorban lévő lőporgázok energiájára írható, hogy:

$$E_{gm}(t) = f \cdot m_{gáz_gm}(t) - \frac{m_{gáz_gm}(t)}{\Omega_0} \cdot \left(\frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 \right), \quad (45)$$

rendezve:

$$E_{gm}(t) = m_{gáz_gm}(t) \left(f - \frac{(\kappa - 1)}{2 \cdot \Omega_0} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 \right). \quad (46)$$

A fegyvercsőben a gázsűrűség:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_{cső_45^*sz} - m_{gáz}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot (\Omega_{cső_45^*sz} - m_{gáz}(t))}. \quad (47)$$

A tartomány további főegyenletei:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}p(t) &= \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot (\Omega_{cső_45^*sz} - m_{gáz_gm}(t) - m_{gáz}(t)) - \frac{(\kappa - 1) \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2}{2}}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot (\Omega_{cső_45^*sz} + m_{gáz_gm}(t) - m_{gáz}(t))} \right), \end{aligned} \quad (48)$$

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1) \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2}{2}}{W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{cső_45^*sz} + m_{gáz_gm}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right), \quad (49)$$

ahol:

$\Omega_{cső_45^*sz}$ az 5*. tartomány kezdeti pillanatában a *csőfuratban* lévő löporgáztömeg, mértékegysége: kg.

A 6*. tartomány egyenletei

Felírható a (16), a (17), a (18), a (19) és a (33) főegyenlet, továbbá a (21), a (22), a (23) és a (28) segédegyenlet.

A fegyvercsőben a gázsűrűség:

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega_{56^*sz} - m_{gáz}(t)}{W_0 + W_{cső} + W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{56^*sz} - m_{gáz}(t))}. \quad (50)$$

A fegyvercső gáznyomására írhatjuk, hogy:

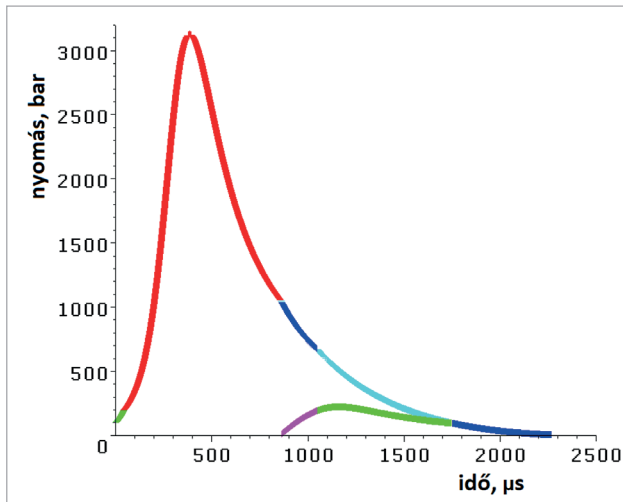
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}p(t) &= \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{f \cdot (\Omega_{56^*sz} - m_{gáz}(t)) - \frac{(\kappa - 1) \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v_0^2 - \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)}{2}}{W_0 + W_{cső} + W_{gm} - \alpha \cdot (\Omega_{56^*sz} - m_{gáz}(t)) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)} \right), \end{aligned} \quad (51)$$

ahol:

Ω_{56^*sz} a 6*. tartomány kezdeti pillanatában a *csőfuratban* és a *gázhengerben* lévő löporgáztömeg, mértékegysége: kg.

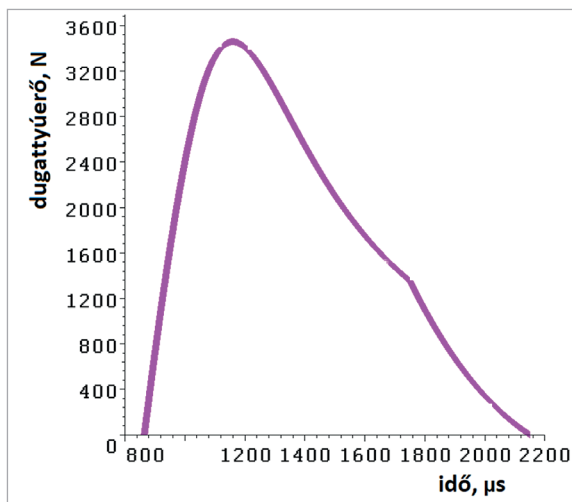
(A leszűkült keresztmetszetre a szimulációs számítás [1., 2. ... 5*. és 6*. tartományok] a 9. ábrán látható zöld görbét adta, ahol a *gázátömlő furat* átmérője 0,85 és 0,4 mm között volt.)

A 0,4 mm-es furathoz tartozó egyesített gáznyomásgörbén (17. ábra) jól látható, hogy a *gázmotor* a benne mozgó *gázdugattyú* térfogatnövelő hatása miatt már alig tud feltölteni. Az alacsony *gázhengernyomás* miatt a *gázdugattyúra* ható erő is lényegesen kisebb lesz (18. ábra).



17. ábra: A 0,4 mm-es furatátmérőhöz tartozó egyesített gáznyomásgörbe

Forrás: a szerző szerkesztése



18. ábra: A gázdugattyúra ható erő diagramja 0,4 mm-es furatátmérő esetén

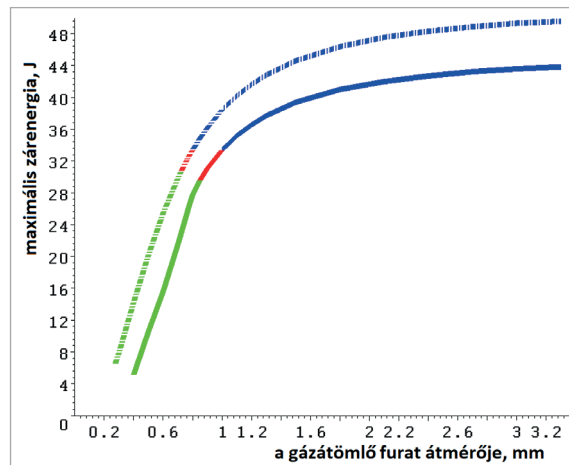
Forrás: a szerző szerkesztése

A gázmotor a lövedék kilépése előtt feltöltődik (normál üzemállapot) – számítás a redukált zárszerkezetrendszer leválasztásával

Ebben az esetben egyszerűsített számításokat végzünk, de ezt a módszert csak előtervezési szinten használhatjuk. (A bevezetőben említettük, hogy a *redukált zárszerkezetrendszer* leválasztása csak korlátozottan alkalmazható módszer, az eredmények összehasonlításával látni fogjuk használhatóságának határait.)

A leválasztás kétféleképpen történhet:

1. Elhagyjuk a zár egyenleteit, és a *gázhenger* nyomásfüggvényének az integrálásából nyert impulzussal számolunk.
2. Megtartjuk egyenleteinket, és a *gázátömlő furat* átmérőjén kívül a fegyver bizonyos paramétereit a számítás egyes részeiben megváltoztatjuk, manipuláljuk.



19. ábra: A két rendszer kapcsolatával számított egyszerűsített (szaggatott görbe), és a 3 rendszer kapcsolatán alapuló szimuláció zárenergia-gázátömlő furat átmérő diagramja

Forrás: a szerző szerkesztése

További számításaink során az utóbbi eljárást alkalmazzuk.

Első lépésben megváltoztatjuk a *redukált gázhengerrendszer* kezdeti térfogatát, értékét zérusnak vesszük. Ezzel a rendszerkapcsolat közvetlen lesz, modellünk szerint a *csőfurat* nyomása a *gázdugattyún* azonnal jelentkezik. (A számítások során a zérussal való osztást elkerülendő $W_{gm} \approx 10^{-10}$ értéket választottunk.)

Megváltoztatjuk a redukált zárszerkezetrendszert:

1. Elhanyagoljuk a sűrűlódó- és a rugóerőt, valamint nem számolunk másodlagos munkákkal, azaz $F_r = 0$, $F_r = 0$ és $c_r = 0$ és $\varphi_{zár} = 1$. Ezzel a *redukált gázdugattyúrendszert* egyetlen szabad tömeggé egyszerűsítjük.
2. Megnöveljük a szerelt zárkeret tömegét a $mult_{zár_tömeg}$ -szerezésére, azaz mozgásának térfogatnövelő hatását gyakorlatilag elimináljuk (például $mult_{zár_tömeg} \geq 10^4$ értéket állítunk be).

3. A zársebesség függvény maximumából kalkulálható zárenergia-maximumot az eredeti zártömegre és zársebességre számítjuk ki, azaz:

$$E_{\text{zár_max}} = \frac{m_{\text{zár}}}{mult_{\text{zár_tömeg}}} \cdot \frac{(mult_{\text{zár_tömeg}} \cdot v_{\text{zár_max}})^2}{2} = \frac{mult_{\text{zár_tömeg}} \cdot m_{\text{zár}} \cdot v_{\text{zár_max}}^2}{2}. \quad (52)$$

Ezekkel a manipulációkkal nincs szükségünk új egyenletekre, közvetlenül használhatjuk a már meglévőket. Ügyelni csak arra kell, hogy a számítások során a lebegőpontos számbábrázolási pontosság elégséges legyen a kicsiny zársebesség- és zárelmozdulás-értékek ábrázolásához.

Ez a számítás egyenértékű – ha a virtuális tömeg ($mult_{\text{zár_tömeg}} \cdot m_{\text{zár}}$) elegendően nagy, és a *gázhenger* kezdeti térfogata elegendően kicsi – a csak két rendszert figyelembe vevő módszerrel.

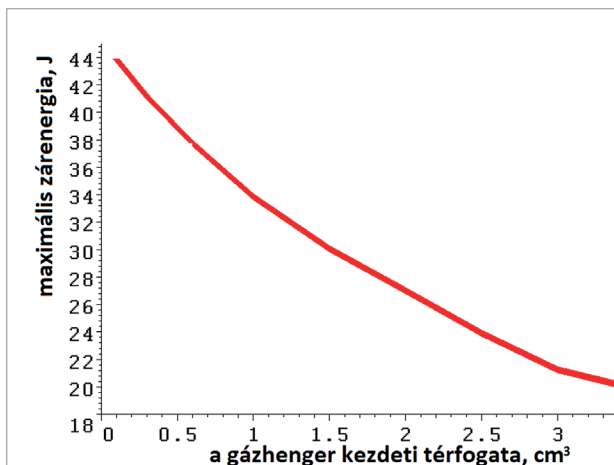
A számítások eredményeit a 19. ábra mutatja, a mindhárom rendszer kapcsolatával kiszámolt (15. ábra) eredményekkel együtt.

A grafikonról leolvasható, hogy a csak két rendszerre felállított modell alkalmazásával jelentősen alul fogjuk méretezni a fegyverünket, ugyanis azokkal magasabb zárenergiákat fogunk számolni, mint a valóságot jobban közelítő (három rendszer kapcsolatán alapuló) modellel.

Eredmények növelt gázhenger-térfogatú fegyverre

Válasszuk ki a 4. szakasz gázhengernyomás 14. egyenletét. Látható, hogy a *gázhenger* kezdeti térfogata (W_{gm}) a nevezőben szerepel, ezért növekvő értéke mellett a deriváltfüggvény értéke csökkenni fog. Ebből az következik, hogy a kamra nyomásfelfutási sebessége kisebb lesz, azaz a *gázmotor* lassabban fog feltöltődni, ezért a kiegyenlítődési pont időben eltolódik. A kiegyenlítődési nyomás mint a kamra csúcshőmérséklete is egyre kisebb lesz, mivel a *csőfurat* nyomásgörbéjének a csökkenő ágán mozgunk, tehát a kamra térfogatnövekedésével a *gázmotor* által szolgáltatott munka is egyre kevesebb lesz. Másképpen fogalmazva a kamranyomás lágyabb felfutása, egyben kisebb nyomásértékbe történő befutása miatt hasonló jelenség játszódik le, mint a *gázátömlő furat* leszűkülése esetében.

A 20. ábra a 3,3 mm-es *gázátömlő furatú gázmotor* szimulációs számítását szemlélteti a kezdeti gázhengertérfogat-zárenergia függvényében.



20. ábra: A gázhenger kezdeti térfogatának hatása a maximális zárenergia 3,3 mm-es gázátömlő furat esetén

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy a gázhenger kezdeti térfogatának (holtterének) növelésével a gázmotor munkája csökkenthető. Ezzel akkor lehet élni, ha a gázelvételi pontot közelebb kell hozni a csőfarhoz, például a cső megrövidítése miatt. A gázátömlő furat áthelyezésénél újra ki kell számolni az egyenleteket, mert a megnövekedő gázimpulzus a tokszerkezetet és a gázdugattyút is tönkretelheti. A 21. ábrán egy tönkrement, a gázelvételi pont áthelyezése miatt a méretezésinél nagyobb terhelést kapott osztott gázdugattyú látható.



21. ábra: A gázátömlő furat áthelyezése miatt túlterhelődött és tönkrement gázdugattyú

Forrás: a szerző felvétele

Mérések és mérési eredmények

A modellek érvényességi tartományának, valamint a modellparamétereknek a meghatározása céljából méréseket hajtottunk végre gyorsfilmző kamera segítségével. A vizsgálatok kiterjedtek a lövés utáni zármozgás és a lövés közbeni/utáni csődeformációk, valamint a csőlengési jelenségek megfigyelésére.

A mérést állítható univerzális befogószerkezetbe rögzített fegyverrel végeztük (22. ábra). A zármozgásokat egységesen 3000 fps (*frame per second*) értékkel rögzítettük. Az elmozdulásértékek könnyebb meghatározása érdekében a szerelt tok jobb oldalára hajlékony műanyag vonalzót rögzítettünk. Az előzetes szimulációs számítások szerint a gerjesztési hossz hozzávetőlegesen 18 mm, ezért az értékelés során a mozgás első 20 mm-ét megjelenítő képkockákat (a tranziens jelenségek miatt) nem vettük figyelembe, és a felütközést rögzítő képkockákat is elhagytuk. A kiértékeléshez így rendelkezésünkre állt összesen 32 darab képkocka.



22. ábra: A zármozgás filmezéséhez befogott és preparált AMMSZ gépkarabély

Forrás: a szerző felvétele

A zársebesség-idő, zársebesség-zárút függvény előállítás

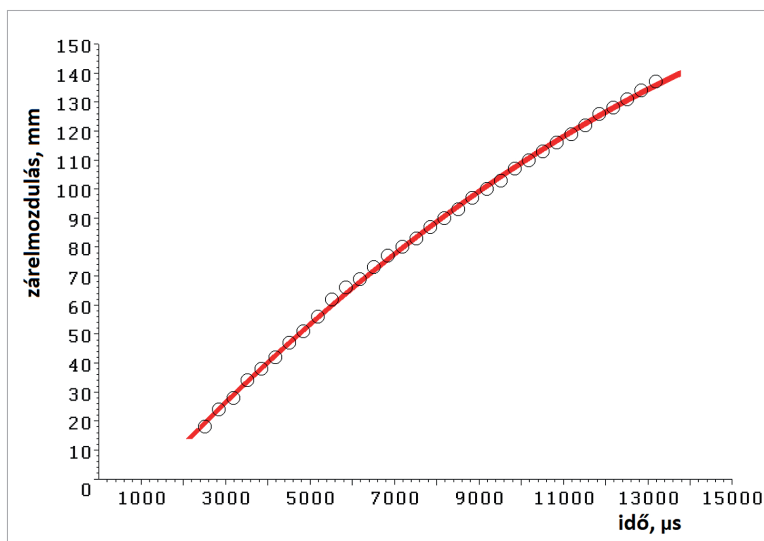
3000 fps sebesség mellett két képkocka rögzítése között $1/3000$ s ($333 \mu\text{s}$) idő telik el. A képeket egyesével értékelve leolvastuk a felhúzókarhoz rögzített virtuális pont felvételenkénti koordinátáját, és azok növekményeit az eltelt idővel párokba állítottuk, ezzel

megkapva a zárút-idő értékpárokat. A párokra másodrendű¹⁶ regressziós polinomot illesztettünk, és innentől ezt tekintettük a zárút-idő függvénynek.

A zárút-idő függvény egyszeres deriválásával előállítottuk a zársebesség-idő függvényt. A szemléletesség érdekében szükségünk volt még a zársebesség-zárút függvényre, amelyet az előzőkből már elő lehetett állítani.

A maximális zársebességet közvetlenül a felvételekből nem, de a regressziós egyenletekből már meghatározhattuk. Szükségünk van a regressziós zársebesség-egyenlet $t = t_{\text{zár.vmax}}$ időpillanatban vett helyettesítési értékére, ahol $t_{\text{zár.vmax}}$ a szimuláció során kapott érték, a zár sebességének maximumához tartozó időpillanat. Az így kapott helyettesítési értékhez kellett iterációs lépéseken keresztül beállítanunk a szimulációs paramétereket, adott relatív hiba mellett.

A 23. ábra a képkockákról leolvasott zárelmozdulás-idő értékpárosokat és a zárelmozdulás-idő regressziós polinomot szemlélteti. Jól kivehető, hogy a leolvasott értékek (kék körök) a regressziós görbét két és fél periódusban „körbelengik”, ami a helyretoló rugó longitudinális lengéséből adódik.



23. ábra: A zárelmozdulás-idő függvény, a regresszió alapját adó értékpárosokkal

Forrás: a szerző szerkesztése

¹⁶ Mivel a helyretoló rugó karakterisztikája lineárisnak (de állandónak nem) vehető, ezért annak grafikonja monoton növekedő egyenes, a zár hátramoszgási útjának függvényében. Ezt az egyenest a zárút elsőrendű függvénye írja le. A karakterisztika első, illetve második integrálja egyenesen arányos a zársebesség-, illetve a zárút-függvényvel. Mindezekből következik, hogy a zárút-idő függvény legjobb közelítését harmadrendű regressziós polinom szolgáltatja. A másodrendű polinommal való közelítés azért szükséges (bár nem a legjobb egyezést adja), mert a helyretoló rugó szuperponálódott longitudinális lengése (23. ábra) miatt a harmadrendű polinom elfajul, a zár felütközése előtt gyorsuló zármozgást szolgáltat, amely ellentétes úgy a modellünkkel, mint a valósággal.

Következtetések

A ballisztikai rendszer hozzátétőlegesen 15 paraméterét a tapasztalatok vagy lőszer-gyári mérési jegyzőkönyvek alapján állítottuk be a szimuláció során, amely jellemzők csak a lőszerre vonatkoznak. A fegyver tulajdonságait vagy másik fegyverből, vagy rajzdokumentációkból állapítottuk meg. Nyilvánvaló, hogy pontosabb szimulációt csak jól beállított paraméterek mellett lehet elvégezni. A módszer validálása, érvényességi tartományának megállapítása egy jól előkészített és megtervezett méréssorozatot igényel. Egy ilyen méréssorozat megtervezésének, végrehajtásának főbb lépései a következők:

- Kézzel szerelt löszereket kell használni, amelyek esetében minden töltési és alkal-telemadat ismert.
- Laboratóriumban bevizsgált, mérési jegyzőkönyvvel ellátott löport kell alkalmazni.
- Az elkészített löszerekből legalább tíz darabot fel kell használni ballisztikai nyom-másméréssel egybekötött sebességméréshez.
- Mérési sorozatokat kell végrehajtani eltérő töltettömegű és löportípusú lőszer-csoportokkal az előzőek betartása mellett.
- A fegyver valamennyi, szimulációt érintő jellemzőjét meg kell mérni.

Amennyiben ezekkel az eljárásokkal hajtjuk végre újból a méréseket, akkor lehetséges a validáció és a módszer hibájának, érvényességi tartományának meghatározása. Lássuk be, hogy az összes paraméterre nem tudunk méréssorozatot építeni, mivel azok száma magas, valamint a fegyver paramétereit nem tudjuk speciális mérőfegyver hiányában kontrolláltan változtatni. (Természetesen ipari igény és források rendelkezésre állásával mérőfegyver bármikor tervezhető és építhető.)

Milyen következtetéseket lehet levonni a szimulációkból a leszűkült átömlési kereszt-metszetekre, a csölgengésekre, valamint az alkalmazott modellek bonyolultsági fokára nézve? Az eredmények megfigyelésével az alábbi megállapításokat tehetjük:

- A *gázátömlő furat* keresztmetszetének csökkenésével csökken a *gázmotor* munkavégző képessége és a zár hátrasiklási energiája is. A görbe aszimptotikus jel-legű, tehát találunk olyan tartományt, ahol a fegyver biztonságosan tud működni még jelentősen leszűkült átmérő mellett is. A zárenergia jelentősen csökken, ha a *gázhenger* hosszú ideig töltődik, de az automatika működése még biztosítható lesz (15. ábra kék görbéje).
- Ha a keresztmetszet csökkenése elér egy kritikus értéket, ahol már a *gázmotor* nem vagy csak igen lassan tud feltöltődni, a *gázmotor* munkavégző képességének csökkenése felgyorsul, a fegyver automatikájának működése bizonytalanává válik, majd megszűnik (15. ábra piros és zöld szakasza).
- *Gázátömlő furat* kialakításánál figyelembe kell venni a annak leszűkülését, ezért mindig érdemes azt túlméretezni és/vagy állíthatóvá tenni (15. ábra kék szakasza).
- Gázmotorok elhelyezésénél különös figyelemmel kell lenni a gázelvételi pont csőfartól, valamint csőszájtól mért távolságára.

- Az elkokszolódás elkerülése és az üzembiztonság növelése érdekében a *gázátömlő furatot* a nyomásgörbe leszálló ágában, a löporégés utáni szakaszban célszerű elkészíteni.
- *Gázátömlő furatok* áthelyezése esetén ki kell számítani az ébredő terheléseket, mert a fegyvert túlterhelések érhetik, amelyek nemcsak a fegyver üzembiztonságát csökkentik, hanem annak idő előtti tönkremenetelét is okozhatják (21. ábra).
- A *gázhenger* holtterét új konstrukciók esetén úgy kell kialakítani, hogy az a lehető legkisebb térfogattal rendelkezzen, mert a *gázmotor* munkavégző képessége ezzel a térfogattal fordítottan arányos (20. ábra).
- A *gázhenger* kezdeti térfogatának növelését modifikált konstrukciók esetén szükségmegoldásként lehet alkalmazni, de számolni kell a megnövekedő gázkifújásokkal és azok minden káros hatásával.
- A *gázdugattyút* tartalmazó fegyverkonstrukcióknál minden esetben ki fognak alakulni nemkívánatos és nem elhanyagolható jelentőségű, de számítható és kontrollálható *fegyvercső-hajlítólengések* (13. ábra). Ezek megléte adottság, tervezési szinten mérlegelnünk kell, hogy a műszaki követelmények kielégíthetőek-e ezzel a konstrukcióval. A teljesség igénye nélkül és erősen leegyszerűsítve az alábbi két feladatot biztosan nem lehet gázdugattyús rendszerekkel megfelelően megvalósítani:
 - nagy tűzgyorsaságú automata fegyvert létrehozni (vö. PKM és MG 42);
 - mesterlövész-feladatokra alkalmas fegyvert elkészíteni (vö. SzVD és MSG90).
- A gépkarabélyok többsége *gázdugattyús* automatikával rendelkezik. Ezen fegyverek esetében kompenzátor alkalmazása nem javasolt, legfeljebb szimmetrikus gázkiáramlású csőszájfékek, lángrejtők, hangtompítók használata elfogadható.
- A belső ballisztikai rendszerek kifejezetten érzékenyen reagálnak a paraméterek legkisebb megváltozására is, ezért egyszerű modelleket alkalmazni nem érdemes, különös tekintettel arra, hogy a modellhibákból adódó konstrukciós hibák itt kimondottan balesetveszélyesek. A minél valóságosabb modellállításba, a fizikai folyamatok feltárásába, az egyenletek felállításába, azok leprogramozásába és a paraméterek minél pontosabb ismeretébe, de legfőképpen a mindezeken megértesébe, megismerésébe, megtanulásába fektetett munkát nem lehet megtakarítani.

Felhasznált irodalom

- CARLUCCI, Donald E. – JACOBSON, Sidney S. (2018): *Ballistics. Theory and Design of Guns and Ammunition*. Boca Raton: CRC Press.
- CHINN, George M. (1951): *The Machine Gun*. Vol. 1–5. Washington, D.C.: Government Printing Office.
- CERNÁK Gábor – STÉPÁN Gábor (2019): *Rezgéstan*. Budapest: Akadémiai.
- ÉGERT János – JEZSÓ Károly (2006): *Mechanika. Rezgéstan*. Győr: Széchenyi István Egyetem.
- Online: <http://jegyzet.sze.hu/index.php?fajl=jegyzett&tsz=gs&intz=ivi&kr=mtk&PHPSESSID=e4c6ab3656bc9b59ffbc7917d9c87299>

- KIRILLOV, Viktor Mihajlovics (1973): *Teorija i raszcset avtomaticseszkovo oruzsija*. Penza: PVAIU.
- ZALKA Károly (2015): *Mechanika II. Szilárdságtan*. Budapest: szerzői kiadás. Online: <https://docplayer.hu/16925156-Mechanika-ii-szilardsagtan.html>