

TK 156.452

KFKI-1982-40



PERNECZKY L.

A RELAP4 PROGRAM ALKALMAZÁSÁNAK
NÉHÁNY KÉRDÉSE

Hungarian Academy of Sciences

**CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS**

BUDAPEST

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes the need for transparency and accountability in financial reporting.

2. The second part of the document outlines the various methods and techniques used to collect and analyze data. It includes a detailed description of the experimental procedures and the tools used for data collection.

3. The third part of the document presents the results of the study, including a comparison of the different methods and techniques used. It discusses the strengths and weaknesses of each approach.

4. The fourth part of the document discusses the implications of the findings and provides recommendations for future research. It highlights the need for further investigation into the effectiveness of the different methods and techniques.

5. The fifth part of the document concludes the study and summarizes the key findings. It reiterates the importance of maintaining accurate records and the need for transparency and accountability in financial reporting.

A RELAP4 PROGRAM ALKALMAZÁSÁNAK
NÉHÁNY KÉRDÉSE

Perneczky László

Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf.49

TARTALOM

KIVONAT

A tanulmány a RELAP4 program mod3 és mod6 változataival elvégzett reaktorbiztonsági számítások néhány fontos tapasztalatát ismerteti. A geometriai sémaelemek és jelölésük informatív jellegű áttekintése után taglalja a séma-választás problematikáját a VVER-440 reaktor primer hűtőköre modellezése szempontjából, utmutatást nyújt néhány konkrét modellválasztási kérdésben. Mindezzel a felhasználói tapasztalatok jelentős szerepére hívja fel a figyelmet a kód alkalmazásában és a kapott eredmények interpretálásában.

1. Bevezetés

A könnyűvízhűtésű atomreaktorok primer hűtőkörére felírható időfüggő hidrodinamikai differenciálegyenlet-rendszerek igen erősen nemlineárisak a hőhordozó közeg állapotegyenletei, valamint a térben elsősorban a hűtőközeg lokális paramétereitől függően változó, általában csak empirikus formában megadható határfeltételek miatt, ezért csak numerikus úton oldhatók meg.

Csak utalunk arra, hogy a rendszerben a hőhordozó két fázisban is áramolhat, illetve egyidejűleg több közeg is jelen lehet /gondoljunk a hidroakkumulátorokban lévő nitrogénre, vagy a hermetikus helyiségekben lévő levegőre/. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy általában a termodinamikai egyensúly sem áll fenn a közeg két fázisa között, különösen ha a nyomás is gyorsan változik.

A numerikus modellezés alapja a rendszer nodalizálása, vagyis olyan térfogatelemekre bontása, amelyeken belül a hőhordozó közeg a térfogatra átlagolt paramétereivel elfogadhatóan jellemezhető. A mennél több elemre bontásnak azonban határt szab a számítási eszközök véges kapacitása, azaz számítógépeinknél a korlátozott erőforráslekötés /operatív és háttér tár/ és gép-időfelhasználás lehetősége. Ugyanilyen okok miatt a peremfeltételeknél az alapvető fizikai jelenségek mellett néhány másodlagos hatást el kell hanyagolnunk, illetve a feltételek egyszerű megfogalmazására kényszerülünk. Ugyanezek érvényesek a hidraulikai csatornához csatolt hővezető elemekben a hővezetési differenciálegyenletek megoldására is.

A felhasználók rendelkezésére bocsájtott számítógépi kódok már valamilyen szintű kompromisszumot képviselnek, vagy olyan mélységig, hogy rögzített sémához kell igazítani a feladatot /ilyen programcsalád például az NSZK-ból származó BRUCH-D [1]/, vagy azzal, hogy ugyan tetszőleges geometriát engednek meg, de a fi-

gyelembe vehető fizikai jelenségek adott körét nem lehet túllépni. Mindez azonban nem jelenti azt, hogy a felhasználó szempontjából az elvégzendő termohidraulikai számítások az input adatok rutinszerű összeállítására és a programok futtatására egyszerűsödnének. A számítások előkészítése, de főleg ezzel összefüggően a kapott eredmények interpretálása érdemi mérnöki-fizikusi tevékenységet kíván.

Fokozottan érvényes ez a megállapítás az USA-ban kifejlesztett RELAP4 kódra /ill. ennek különböző változataira/ [2], [3], [4], amelyet ellentétben a rögzített séma keretében történő BRUCH-D számításokkal, elsősorban a geometriai flexibilitás jellemez. Ennek kétségtelen előnye az, hogy bármilyen hidraulikai rendszerre le lehet képezni térfogatok és hővezető elemek egymáshoz kapcsolása révén. Ugyanakkor nem hagyható figyelmen kívül - és néha hátrányként is jelentkezik - , hogy ugyanannak a rendszernek a szimulálására igen sok, részletesebb, vagy egyszerűbb nodalizációs séma vehető fel és ezek közül kell a legalkalmasabbat kiválasztani. A geometriai modell kiválasztásán túl egy sor fizikai modell-opció megválasztásában, vagy alkalmazásáról is dönteni kell a RELAP4 felhasználóinak. Mindez azt jelenti, hogy e kód eredményes futtatása, vagyis reálisan értékelhető eredmények produkálása csak fáradságos és főleg gépidőigényes elemzések alapján nyert tapasztalatok birtokában remélhető.

Néhány ilyen tapasztalatról, illetve kialakított gyakorlatról számolunk be a következőkben. [17]

2. A geometriai séma elemei

Mint a bevezetőben említettük, a RELAP4 program alkalmazása a geometriai séma létrehozásával kezdődik, amely három alapvető elem láncolatából áll össze. A modellezni kívánt hidraulikai rendszert, amelyben a hőhordozó közeg, a víz áramlik, térfogatelemekre bontjuk. E térfogatelemek /a programban használatos

megnevezése control volume, jelölése az ábráinkon: V/ száma adja a vizsgált probléma dimenzióját, bonyolultsági fokát. Az eredeti RELAP4 programváltozatokban a térfogatelemek számának felső korlátja NVOL \leq 75. A KFKI-ban adaptált RELAP4-mod3 verziónál az ESz-1040 számítógép rendelkezésre álló memóriakapacitása miatt e felső határt 45-re csökkentettük. Az egyes térfogatelemeket "ablakok" /a programban használt elnevezése junction, jele az ábráinkon: J/ kapcsolják egymáshoz, illetve a nem modellezett környezet ilyen kapcsolatok révén definiálható, mint határfeltétel a térfogatelemek részére. Az összeköttetések maximális száma általában NJUN \leq 100, illetve a redukált terjedelmű programváltozatunkban NJUN \leq 60.

A térfogatelemek azon felületeit, amelyek az "ablakok"-ra mérőlegesek, illetve az áramlás tengelyével párhuzamosak, általában teljesen hőszigeteltnek tételezzük fel. Azoknál a térfogatelemeknél viszont, amelyeknél a hőközlés vagy hőelvonás nem hanyagolható el; a térfogatelemhez geometriailag is illesztett hővezető elemeket /elnevezésük heat slab, jelölése: S/ csatlakoztatunk. Ezek maximális mennyisége: NSLB \leq 50.

Az előzőekben leírt három alapvető elem, illetve az ezekből összefűzött rendszer önmagában még nem elegendő a hidraulikai rendszer, elsődlegesen a könnyűvízhűtésű atomreaktor primer hűtőkörének modellezésére. További kiegészítő elemekre is szükség van, amelyek lényegében a már említett három elem speciális változatai.

Igy speciális térfogatelemként szerepel a közelebbről nem definiált és 0 sorszámmal jelölt környezet. Itt említjük meg, hogy a hermetikus teret ilyen 0 -val jelölt, konstans nyomású térként is kezelhetjük, de célszerűbb valóságos térfogatelemként, geometriailag is definiáltan modellezni /erre még visszatérünk/.

Másik speciális térfogatelem az időfüggő térfogat, az u.n. time-dependent volume, jele: T, amelynek paramétereit az idő függvényében táblázatosan lehet inputként megadni /NTDV \leq 10/.

A speciális kapcsolatok a következők:

- két valóságos térfogatelem között elzáró szerelvényt /tolózár, szelep/ is tartalmazó "ablak" /elnevezése: check valve, jele: C/, amelyből max. 10 db lehet;
- szivattyut tartalmazó valóságos térfogatelem két oldalához csatlakozó, a szivó és nyomó oldalt reprezentáló ablakok; a szivattyuk maximális száma 12, jelük: P;
- a 0 jelű környezetbe történő kiömlés modellje, elnevezése leak, jele: L /NLK \leq 5/;
- a 0 jelű környezethez csatlakozó töltő ablak, az u.n. fill junction, jele: F, ez a tömegáramnak, mint határfeltételnek definiálását szolgálja /NFLL \leq 5/.

A speciális kapcsolatoknál a vizsgált folyamatok során egyes jellemzők megváltozására kerül sor, ilyen például a szivattyu leállása, szelepek nyitása vagy zárása, stb. E változások időpontját megadhatjuk, de feltételek teljesüléséhez is köthetjük őket. A feltételeket az u.n. trip control kártyák tartalmazzák.

A hővezető elemek speciális változata a hőforrást tartalmazó, így az atomreaktor fűtőelemeit modellező u.n. core slab elem /NCOR \leq 25/, amelynél a hőforrást vagy a neutronkinetikai egyenletek megoldásával, vagy a relativ teljesítmény időbeli változásával, végül előző számítás eredményeiből való átvétellel lehet definiálni. A hővezető elemnek a gőzfejlesztő modellezésénél való alkalmazásáról a [14] ad áttekintést.

3. A térfogatokra bontás kérdései

Amikor a hat, illetve négy hűtőhurkos VVER-típusú reaktorok hűtőközegelvezéses üzemzavarainak /LOCA/ vizsgálatához a RELAP4 kódot kívánjuk alkalmazni, kézenfekvő megoldásnak látszik a BRUCH-D program geometriai sémájának reprodukálása né-

hány kiegészítő térfogatelem felvételével. Ez utóbbiakra a primerköri csővezetékeknél, elsősorban a szivattyuknál - a RELAP3 kódban a szivattyu-modell két térfogatelem kapcsolódásánál volt elhelyezhető, a RELAP4 kódcsaládban azonban saját térfogatelemet igényel - , valamint a törés helyének környezetében van szükség. Ilyen térfogatra bontási sémát mutat az 1.sz. ábra. Hasonló sémával dolgoznak a szófiai Atomkutató és Atomenergetikai Intézetben, vagy akár a BRUCH-D kód hazájában, az NSZK-ban is a RELAP4 blowdown alkalmazásainál. [8, 13]

A tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy ez nem a legcélszerűbb megoldás. Lehetőséget ad ugyan a BRUCH-D kóddal kapott hasonló eredményekkel való összevetésre, de ezen túlmenően észszerűbb és mindenképpen gazdaságosabb mindig az adott feladat igényeinek megfelelően végrehajtani a nodalizálást.

Mindenekelőtt leszögezhetjük, hogy egyes üzemzavari folyamatok globális megismerésére lényegesen egyszerűbb sémák kialakítása is megengedhető. Erre mutat példát a 2.sz. ábra [15]. Felesleges az aktiv zónát 4 térfogatra osztani, ha csak az átlagos terhelésű hűtőcsatornát modellezzük, /a forrócsatorna-analízisre még külön visszatérünk/ felesleges a by-pass utak szimulálása is, elsősorban az 1.sz. ábra 15 jelű térfogata hagyható el, míg az 5 jelű térfogatnak csak a természetes cirkulációs hűtés vizsgálatánál van jelentősége.

Ugyancsak gyorsíthatjuk a számítást a nagy keresztmetszetű törésekkel kapcsolatos biztonsági elemzéseknél, ha a gőzfejlesztőt egyetlen térfogatként kezeljük. Hat térfogatelemre való felosztás csak abban az esetben indokolt, ha - mint a kis folyások esetében látni fogjuk - a gőzfejlesztő hőteljesítményét, időfüggvény megadása helyett, a szekunder oldal felvételével és megfelelő hővezetési modellel definiáljuk.

Bizonyos üzemzavari folyamatoknál viszont a főkeringető vezeték vonalvezetését és szintváltozásait jobban visszaadó nodalizációs séma alkalmazására is szükség lehet, gondolunk itt a termé-

szetes cirkulációs folyamatok modellezésére, mely esetben, a csőszifonban pangó víz lényegesen befolyásolhatja az áramlási viszonyokat /vizzsák/.

Végül megemlítjük, hogy a RELAP4-mod6 programváltozatban lehetőség van az ujrancedvesítési folyamat számítására a fűtőelem-rud hővezetési nodalizálásánál alkalmazott ugynevezett "moving mesh" módszerrel, akkor viszont az aktív zóna hidraulikai csatornáját nem lehet axiálisan osztani. Ehhez kapcsolódik a RELAP4 programoknál megoldatlanul maradt probléma: a restart során a nodalizáció megváltoztatása nem lehetséges így, ha egy dinamikus folyamat egyes fázisai eltérő nodalizációt kívánnának meg, a számítás folytatása gyakorlatilag új számítás elkezdését jelentené. Ez azonban csak stacioner állapotból indítható. Egy dinamikus folyamat megszakításakor viszont a folyamatparaméterekre nem teljesülhetnek az egyensúlyi feltételek, elsősorban a nullától különböző gyorsulások miatt. A tapasztalatok szerint, ha a számítást sikerül is újra indítani, az első néhány tized szekundumban minden fizikai tartalmat nélkülöző átmeneti transziensek lépnek fel a rendszerben. Hasonló jelenség tapasztalható a RELAP4 korai változatainál /mod2 - mod3/ egyszerű restart esetében is, ezért ezen programváltozatoknál a restart alkalmazása egyáltalán nem, vagy csak kellő körültekintéssel ajánlható.

4. A hidroakkumulátorok modellezése

Ismeretes /lásd pl. [1] /, hogy a BRUCH-D program a vészhűtés modellezésére hat helyen, mégpedig a 6, 7, 8, 9, 10 és 11 jelű térfogatokhoz kapcsolódóan biztosít oly módon lehetőséget, hogy a betáplált hűtővíz mennyiségét az idő függvényében táblázatosan kell előre megadni. Ugyanilyen modellezési lehetőséget jelent a RELAP4 -ben az u.n. "fill junction"-ok alkalmazása. A vészhűtés ilyen szimulálása csak az aktív vészhűtő rendszerek - nagynyomású és kisnyomású üzembiztonsági zónahűtő rendszer - esetében ajánlható, amikor a szivattyúk által szállított hűtőközeg

mennyisége meghatározott mértékben, mégpedig a szivattyu jelleg-görbéjének megfelelően függ a primerköri nyomás alakulásától. A passzív hűtőrendszerhez ez a szimuláció nagy törések esetén még reálisan figyelembe vehető, más esetekben azonban a hidroakkumulátorok leürülési folyamata olyan erősen függ az üzema-vari folyamat során kialakuló viszonyoktól, hogy az előre nem becsülhető. Erre majd a kis folyásoknál látunk példát.

A nagy törés számításához az időfüggvény felvételében bizonyta-lanságot okoz, hogy a VVER-440 reaktorhoz tartozó műszaki ter-vek ilyen vonatkozásban nem tartalmaznak elegendő információt. Egy hidroakkumulátornál névlegesen 1000 kg/sec víz betáplálása vehető fel, de például a budapesti Villamosenergiaipari Kutató Intézetben, NDK tapasztalatokra hivatkozva ezt az értéket felé-re csökkentve alkalmazták a BRUCH-D -vel végzett számításokhoz, természetesen időben nem változó módon.

Ezek alapján célszerűnek látszott a RELAP4 kóddal paramétervizs-gálat elvégzése a hidroakkumulátorok üzemének megismerése céljá-ból. Egyszerű 3 térfogatos és 2 szelepes modellt alkalmaztunk, ahol egy térfogat a hidroakkumulátort, egy a csővezeték, a harmadik pedig időfüggő paraméterekkel rendelkező térfogattal /time-dependent volume/ a primerköri betáplálás környezetét je-lentette. /A 2.sz. ábrán már ilyen módon szerepelnek az akkumu-látorok, természetesen az időfüggő térfogat nélkül/.

A vizsgálat során a fő figyelmet a rendszernyomás gradiensére fordítottuk. A fokozatosan növekvő nyomáskülönbség hatására a hidroakkumulátorok vizárama is csak fokozatosan növekszik. Így a valóságtól távol van az olyan időfüggvény felvétele, amelyben a visszacsapószelep nyitása után a vész hűtőviz-áram ugrásszerű-en veszi fel a névleges értéket és aztán konstans marad.

A vizsgálat a csővezeték és a szerelvények ellenállásának jelen-tős befolyásoló hatására is rávilágított. A visszacsapó szelep és a leürüléskor lezáró golyós szelep modellezése nem volt prob-lémamentes. Az utóbbira például feltétlenül szükség van, mivel

a hidroakkumulátor teljes leürítését a programfutás zavartalan-
sága miatt mindenképpen el kellett kerülni. Viszont a megadott
szint elérésekor történő túl gyors lezárás esetén numerikus za-
varok jelentkeztek, a csővezetékben a lezárási tranziens nega-
tív nyomásértéket is produkált, ami szintén a számítás folyta-
tásának megghiusításához vezetett. Az optimális lezárási függ-
vény megtalálása mellett még egy fontos tapasztalatot szere-
tünk. A lezárás után végrehajtandó esetleges restartnál a lezá-
rás feltételét tartalmazó "trip control data"-t meg kell vál-
toztatni, különben az egyszer már lezárt szelep nyitott állapot-
ból újra kezdi a lezárási műveletet.

Az elvégzett vizsgálat eredményei alapján készült 3.sz., 4.sz.,
és az 5.sz. ábrák szemléletesen mutatják az ellenállástényező
nagyságának, illetve az ellennyomás változásának jelentős sze-
repét a vészhűtőviz-áram vonatkozásában. A 6.sz. ábrán láthat-
juk [15] alapján az NÁ 233-as vészhűtőviz-vezeték törésekor a
fontosabb paraméterek változását és a hidroakkumulátorok viz-
áramának görbéjét.

5. A törés és a hermetikus tér

A hidraulikai rendszerek hűtőközégelvezetéses üzemzavara első,
u.n. blow-down szakaszában a nyomáscsökkenés és a rendszer le-
ürülés módját a megnyíló törési keresztmetszeten kiömlő közeg-
áram határozza meg. Ennek az áramlásnak a nagysága a folyamat
jelentős időtartományában azonban nem éri el az egyfázisu kö-
zegre felírt impulzusegyenletből számitható értéket, hanem egy
u.n. kritikus kiömlési értékre korlátozódik. Ezt - a közeg ál-
lapotjellemezőit, valamint a rendszernyomás és a környezet nyo-
másának hányadosát figyelembevevő - olyan modellek alapján ha-
tározhatjuk meg, amelyek egy közeg kétfázisu kiömlését, sőt e-
setleg egy második közeg /pl. levegő/ jelenlétét is kezelni
tudják. A következőkben tehát a környezet és a kritikus kiöm-
lés modellezési tapasztalatait foglaljuk össze.

A törés egyszerű geometriai modellezésénél a szimulált rendszer a törés keresztmetszeténél ér véget és határfeltételként az ellennyomás, vagyis a környezet nyomása kerül megadásra - többnyire állandó értékkel. Ilyen modell van a BRUCH-D programváltozatokban és ugyanezt valósíthatjuk meg a RELAP4 kódban lévő, a 2. fejezetben említett u.n. "leak junction" elemmel is, ahol a hűtőközeg a definiálatlan 0 jelű térfogatba ömlik.

Reális eredményeket kapunk, ha a hermetikus teret változó nyomásu, egy, vagy esetleg - a hermetikus térhez tartozó kondenzációs rendszer igen durva modellezését lehető tevő - több, levegőt és már kezdő állapotban is minimális mennyiségű vizet tartalmazó térfogatelemmel modellezzük. Nagy keresztmetszetű törés esetén a nyomás a primer körben hamar lecsökken a külső nyomás közelébe. Például a méretezési üzemzavari folyamatnál ez a 30-40 szekundumos időtartományban várható. A vészhűtőrendszerek által betáplált hideg folyadék hatására azonban a törés és a betáplálás között elhelyezkedő térfogatelemben a nyomás a külső nyomás alá is eshet, ez esetben pedig az áramlás megfordulásával kell számolnunk. Viszont a hermetikus térből levegő bejutása a primerköri térfogatelemekbe fatális hibára vezet. A mod5 változattól kezdődően a containment opció és a "Polytropic Air Expansion Modell" opció javítja a levegőt is tartalmazó térfogatok numerikus kezelését, de az említett problémát kielégítően nem oldja meg.

A törés modellezésének másik kérdése a kritikus tömegkiáramlás meghatározása, azaz a kiömlési modell kiválasztása. A BRUCH-D programban az impulzusegyenlet alapján, a Moody modellből és az izentrop homogén egyensúlyi modellből nyerhető a tömegáram. A RELAP4 első változataiban /mod2 és mod3/ a Moody-modell /M/ mellett a szónikus kiömlési modellt /S/, - amely a lokális hangsebesség, mint kritikus érték, meghatározásán alapul, - használhatjuk. A mod5 változathoz a program fejlesztői további modellek alkalmazását tették lehetővé, így a Henry-Fauske /HF/ és a homogén egyensúlyi modell /HEM/, illetve az előző modellek különböző kombinációit az aláhűtött, illetve telített közegállapot tartományára.

A kísérleti eredmények és a modellek szolgáltatotta adatok egybevetése a következő általános megállapításokhoz vezetett [5, 6]:

- Nincs olyan általános modell, amely a kritikus kiömlésre a csőszakasz hossza, átmérője, valamint a közeg állapotának széles tartományában érvényes lenne.
- Rövid csőcsonkok esetén a termikus nemegyensúlyt figyelembe kellene venni, mert az említett egyensúlyi modellek a kiömlést ilyen esetben mind alábecsülik.
- A közegben oldott gázok mennyisége is befolyásolja a kiömlés nagyságát, ezt a modellek szintén nem tudják figyelembe venni.
- A modellek kombinált használata esetén $X \leq 0$ és $X \geq 0.02$ tartományokra célszerű egy-egy modellt alkalmazni, míg a két érték közötti átmeneti zónában a két modell közötti interpolációt kell megvalósítani.

Az ajánlások és tapasztalatok ezekután a következők:

- a Moody modell alkalmazása nem ajánlható, mert különösen a kiömlés kezdeti, aláhűtött szakaszára extrapolált adatai nem adnak kielégítő egyezést a kísérletekkel. Kombinált formában mégis találkozunk alkalmazásával, pl. az u.n. Evaluation modellben /a HF - M vagy másutt S - M/;
- a Henry - Fauske modell alkalmazása az NSZK-ban kísérleti eredményekkel alátámasztva [7, 8] általánosnak mondható;
- a HEM-modell, amely a szónikus kiömlési modell egy speciális változata, a HF és M modelleknél kisebb kritikus kiömlési értékeket ad és ez a tapasztalatok szerint a telített állapotban jobb közelítést jelent, a LOFT kísérletek kontrollszámításainál is ez adta a legjobb eredményt [5];

- az S modell levegőt is tartalmazó térfogatok csatlakozásainál ad lehetőséget a két közeg figyelembe vételére, megjegyzendő azonban, hogy e modell gépidőigénye a legnagyobb;
- a RELAP4-mod6 változatban a Módosított Burnell-HEM kombinált kiömlési modell is használható, ezzel reprodukálták a Semiscale Mod-1 kísérletek eredményeit úgy, hogy 0.96 és 0.845 értékű szorzótényezőket is felvettek [5];
- végül ugyancsak több helyen szerepel ajánlott kombinált modellként a HF-HEM kritikus kiömlési modell, amelyhez a RELAP4-mod6 -ban még az előzőekben említett 1-nél kisebb szorzótényezőket is alkalmazhatunk [3, 4, 18].

Összefoglalva az elmondottakat, a könnyűvízhűtésű reaktorok hűtőközeg elvesztéses üzemzavaraihoz a HF-HEM kritikus kiömlési modell alkalmazása javasolható a mod6 változatban.

6. Kis folyások vizsgálata

Az 1979 márciusi Three Mile Island 2. blokk üzemzavara óta a figyelem a reaktorbiztonsági vizsgálatok területén a kis átmérőjű csővezetékek törésére és egyéb, kezdetben veszélytelennek látszó, de kifejlődésében fatálisra válható üzemzavari tranziensekre terelődött. Ezeknél a folyamatoknál mind a primer hűtőközeg keringetése, mind az üzemzavari hűtőrendszerek működése jelentős szerepet játszik, de talán leginkább meghatározó a veszélyes állapotok kialakulásában a gőzfejlesztő szekunder oldali hűtésének alakulása lehet.

A Paksi Atomerőmű megbízása alapján a [15] -ben többek között olyan hűtőközeg elvesztéses üzemzavart is vizsgáltunk, amelynél a nyomástartó edény hidegvíz befecskendező 90 mm átmérőjű csőve /3.24 \varnothing keresztmetszet a primer körüli 500 mm-es vezetékre vonatkoztatva/ törött el a villamosenergia-betáplálás egyidejű meg-

szűnésével. A vizsgálat folyamán, amelyet a 2.sz. ábrán bemutatott séma alkalmazásával végeztünk, érdekes jelenséget tapasztaltunk, amely a 7.sz. ábrán látható. A nyomástartó edény - miután elveszti gőzpárnáját és megtelik - nem képes a rendszer nyomását tartani, így az erősen zuhanni kezd. 60 bar alatt a hidroakkumulátorok üzembelépésekor egy kezdeti tranzienst, /viszonylag nagyobb mennyiségű hideg víz befecskendezése/ után a hidroakkumulátorok "megfognak" a rendszert, átveszik a nyomástartás szerepét, így a primer kör nyomása a hidroakkumulátorokhoz igazodik olyan módon, hogy a beálló nyomáskülönbség csak olyan kis mennyiségű vizet hajt ki az akkumulátorokból, amennyi pótolja a törésen távozó hűtőközeget. Ez igen szemléletes példája annak, hogy a hidroakkumulátorok vészhűtővíz-árama mennyire független lehet a tervezési névleges teljesítőképességtől. A hidroakkumulátorok aztán a leürülés következtében az 525 sec után leválasztódnak a rendszerről, ami a primer körben ismét erős nyomászuhanást eredményez.

Ez a vizsgálat a gőzfejlesztő, illetve a szekunder oldali hűtés szimulálási módjának fontosságára is felhívta a figyelmünket. Mint említettük, a 2.sz. ábra szerinti egyszerű, időfüggő gőzfejlesztő modellt alkalmaztuk, azaz csak a primer oldali térfogat paramétereit számítottuk, a szekunder oldal mint határfeltétel szerepelt, ehhez a relatív hőteljesítmény időbeli változását több-kevesebb sikerrel előre becsültük meg. A tapasztalat szerint különböző időfüggvény megadásával az üzembelépési folyamat alakulása lényegesen módosult. Például az előzőekben leírt jelenség során - mivel a primer kör nyomása a szekunderé alatt volt már - a gőzfejlesztő hőteljesítményét elhanyagolhatónak tekintettük. A valóságban azonban a szekunder oldal már ekkor fűti a primer hűtőközeget, amelynek nagyságrendjére és hatására további vizsgálatok szükségesek. Mindezek figyelembevételével egyértelművé vált a gőzfejlesztő modell javításának szükségessége.

A Paksi Atomerőmű adataival tehát a szekunder oldal, mint térfogatelem és "heat slab" -ek felhasználásával a gőzfejlesztő

u.n. általános hővezetési modelljét építettük be a kis folyások vizsgálatára kialakított RELAP4 input-adatfileba a 8.sz. ábra szerint. Ez az ábra a főkeringető vezeték olyan térfogatkrabontását is szemlélteti, amelynél a vizzsákok modellezését is megvalósítottuk.

7. Forró csatorna vizsgálata

Az atomreaktorok biztonsági elemzésének célja a reaktor biztonságos üzemvitelének, illetve üzemzavar esetén a veszélyhelyzetek elkerülése realitásának dokumentálása kritériumrendszer alapján. Az egyik ilyen kritérium az, hogy a reaktor-hűtést érintő üzemzavari folyamatok során az üzemanyag burkolata kiszáradás és túlhevülés következtében se lépjen túl egy megengedett hőmérsékleti értéket. Ez a kritérium a biztonsági számításoknál az aktív zóna néhány lokális paraméterének meghatározását, illetve az ehhez szükséges számítási modell kialakítását követeli meg.

A BRUCH-D programban az aktív zóna modellezése a rögzített séma szerint egy 4 térfogatra osztott átlagos terhelésű hűtőcsatornával és 1-5 különböző terhelésű - például célszerűen egy-egy átlagos és a legjobban terhelt u.n. "forró" - fűtőelemrud /amely axiálisan 4-12 részre osztható/ radiális hővezetési modelljével történik. Ebből következik, hogy a forró rud határfeltételeit is az átlagos hűtőközeg-paraméterek adják, így ez a lokális jelenségeket, pl. a hőátadási krízis kialakulásának körülményeit meglehetősen torzán adja vissza.

A RELAP4 program flexibilitásából értelem szerűen következik, hogy nincs akadálya az aktív zónában több párhuzamos hűtőcsatorna felvételének és így a hővezetési feladat megoldásához a realisabb hűtőközeg paraméterek meghatározásának. A kialakult gyakorlat felhasználja a RELAP4 kódnak azt a szolgáltatását, hogy a mágnesszalagon tárolt eredmények felhasználásával

/2-es FORTRAN input egységként/ lehetséges részfolyamatok számításának szeparált elvégzése. Ennek megfelelően a teljes primerköri analízishez csupán az aktiv zóna globális paramétereit meghatározó egyszerű modellt használjuk /pl. a 2.sz. ábra szerint egyetlen térfogattal és egyetlen hővezető - core slab - elemmel/, majd a zóna alatti és feletti keverőtér tárolt adatainak, mint peremfeltételeknek felhasználásával újabb, u.n. forrócsatorna elemzést végezhetünk pl. a 9.sz. ábra szerinti térfogatra és hővezető elemre osztással, ahol célszerűen a fluxus maximuma környezetében az axiális osztást sűrűbben vetjük fel.

További lehetőséget adnak a hidraulikai határfeltételek felhasználására a kifejezetten a fűtőelem dinamikus viselkedésének elemzésére kifejlesztett kódok, amelyek feltételezik a hidraulikai számításoknak más programmal való elvégzését. Jó példa erre a nyugatnémet SSYST kód [10]. E Stuttgartban és Karlsruheban kifejlesztett programcsomag közvetlen hozzáféréssel rendelkezik a RELAP4 plott-restart adatfile-jához.

8. Neutronkinetika alkalmazása és néhány tapasztalata

A zóna modellezéséről az előzőekben elmondottak hallgatólagosan feltételezték, hogy a reaktor teljesítményének változását a folyamat számított paramétereitől függetlenül, előre időfüggvényként adjuk meg. Azoknál az üzemzavaroknál, ahol a védelem a reaktort leállítja, a maradványhő fejlődésének lefutását irodalmi adatokra támaszkodva jól tudjuk becsülni.

Más a helyzet azoknál az eseményeknél, ahol a reaktivitás előre nem várt módon változik. Ilyen üzemzavarok például a szabályozóköteg kivetődés, vagy a hidegítés /azaz a jelentősen alacsonyabb hőmérsékletű hűtőviznek beáramlása a zónába/, amelyek reaktivitás felszabadulással járnak. Ezeknek az üzem-

zavaroknak az analízise csak kapcsolt neutronikai-hőtechnikai modellekkel képzelhető el. Ilyen lehetőség a RELAP4 kódban is van, mégpedig a térfüggetlen kinetikai egyenletek megoldásával és a hasadási radioaktív termékek maradványhő termelésének figyelembevételével az aktív zóna hővezető elemeinél /core slab/.

Ennek az opciónak a kipróbálására a VVER-440 reaktornál 0,7 % értékeségű egy szabályozóköteg kilöködését követő tranziensek tanulmányozásánál került sor [15, 16], mégpedig oly módon, hogy összehasonlítási alapul az axiálisan egydimenziós kapcsolt neutronikai-hőtechnikai kód, a LINCUP [11, 12] program eredményei rendelkezésre álltak. A RELAP4 számításnál a zóna egyetlen térfogatból állt, tehát pontmodellként szerepelt, míg a LINCUP-nál 36 axiális osztást tartalmazó reprezentáns hűtőcsatornával dolgoztunk. A reaktor relatív teljesítményének változását a 10.sz. ábra mutatja. Az eredmények egyezése jónak mondható. Az eltérések kicsinyek: a LINCUP program szerint a teljesítmény valamivel meredekebben fut fel, a csúcsteljesítmény értéke és időpontja már jobban egyezik, a teljesítmény csökkenése kezdetben mindkét számítás szerint azonos módon történik, de nagyobb időkre a RELAP4-mod3 számítások kisebb teljesítményt adnak. Ennek valószínű oka, hogy a LINCUP számításokban nincs figyelembe véve a reaktorba belépő viznek a tranziens folyamán való hőmérsékletnövekedése.

Mindkét számítás szerint a teljesítménycsúcs a normális teljesítmény mintegy 2.7 -szerese, a csúcs pedig közvetlenül a zavarási tranziens, azaz a szabályozóköteg kilöködés befejezte után lép fel. /A szabályozóköteg a számításban 0.2 sec alatt futott végig az aktív hosszon/.

A számítások azt mutatják, hogy néhány másodpercen belül a nukleáris teljesítmény a névleges teljesítmény alá csökken. Az első másodpercekben a hasadóanyag hőmérsékleti visszacsatolásának a szerepe dominál, a nukleáris teljesítmény lecsengésével azonban egyre inkább az alámódertált reaktorzóna moderátor hőmérsékleti visszacsatolása jut szerephez. A hőmérsékletek emelkedése

a számítások szerint nem veszélyes, összhangban az irodalmi forrásokban találhatóakkal.

A 10.sz. ábra szerinti teljesítménylefutással az előző fejezetben ismertetett 9.sz. ábra szerinti axiális osztású forrócsatorna analízist is elvégeztük. Itt az eredmények már kevésbé megnyugtatóak. A buborék hőmérsékletek a 11.sz. ábra szerint a hőátadási krízis következtében 30 sec után már veszélyes tartományba növekednek. Az eredmény azonban a csatornában keletkező nagymennyiségű gőz visszacsatolása nélkül nyilvánvalóan irreális. Ha viszont a forrócsatorna analízist a lokális paraméterekkel visszacsatolt neutronikával végezzük el, a másik szélső eredményt kapjuk. A realisabb eredményekhez legalább kétdimenziós modellezésre lenne szükség. Ma még azonban nyitott kérdés és további vizsgálatot igényel, hogy hogyan működik a neutronikai modell a RELAP4 kódban, ha a zónát több, különböző terhelésű párhuzamos csatornával modellezzük.

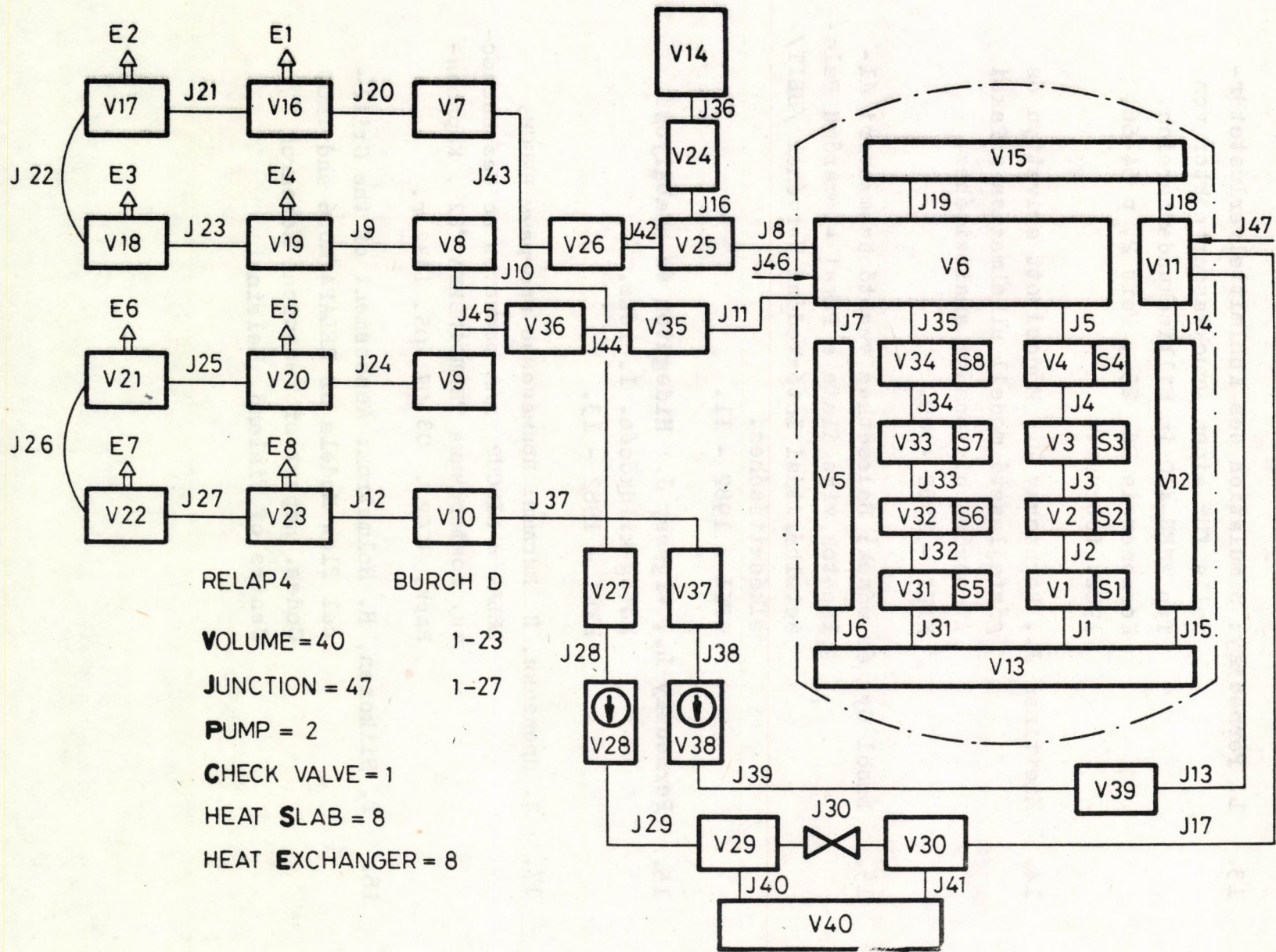
Irodalomjegyzék

1. K. Hofmann: BRUCH-D-06 - Ein Rechenprogramm zur Analyse der fluid- und thermodynamischen Vorgänge im Primärkreis von Druckwasserreaktoren oder in Versuchskreisläufen. MRR-P-25 /1976. december/
2. K.V. Moore, W.H. Retting: RELAP4 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis. ANCR-1127, /1973. december/
3. RELAP4/MOD5 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related System. User's Manual. ANCR - NUREG 1335 /1976. szeptember/
4. RELAP4/MOD6 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems. User's Manual. CDAP-TR-003 /1978. január/
5. Assessement of the RELAP4/MOD6 Thermal-Hydraulic Transient Code for PWR Experimental Applications. EG and G. Idaho. Inc. CCAP-tr-78-035. /1978. december/
6. P. Saha: A Review of two Phase Steam-Water Critical Flow Models with Emphasis on Thermal Nonequilibrium. Brookhaven National Laboratory. NUREG/CR-047. /1978. szeptember/

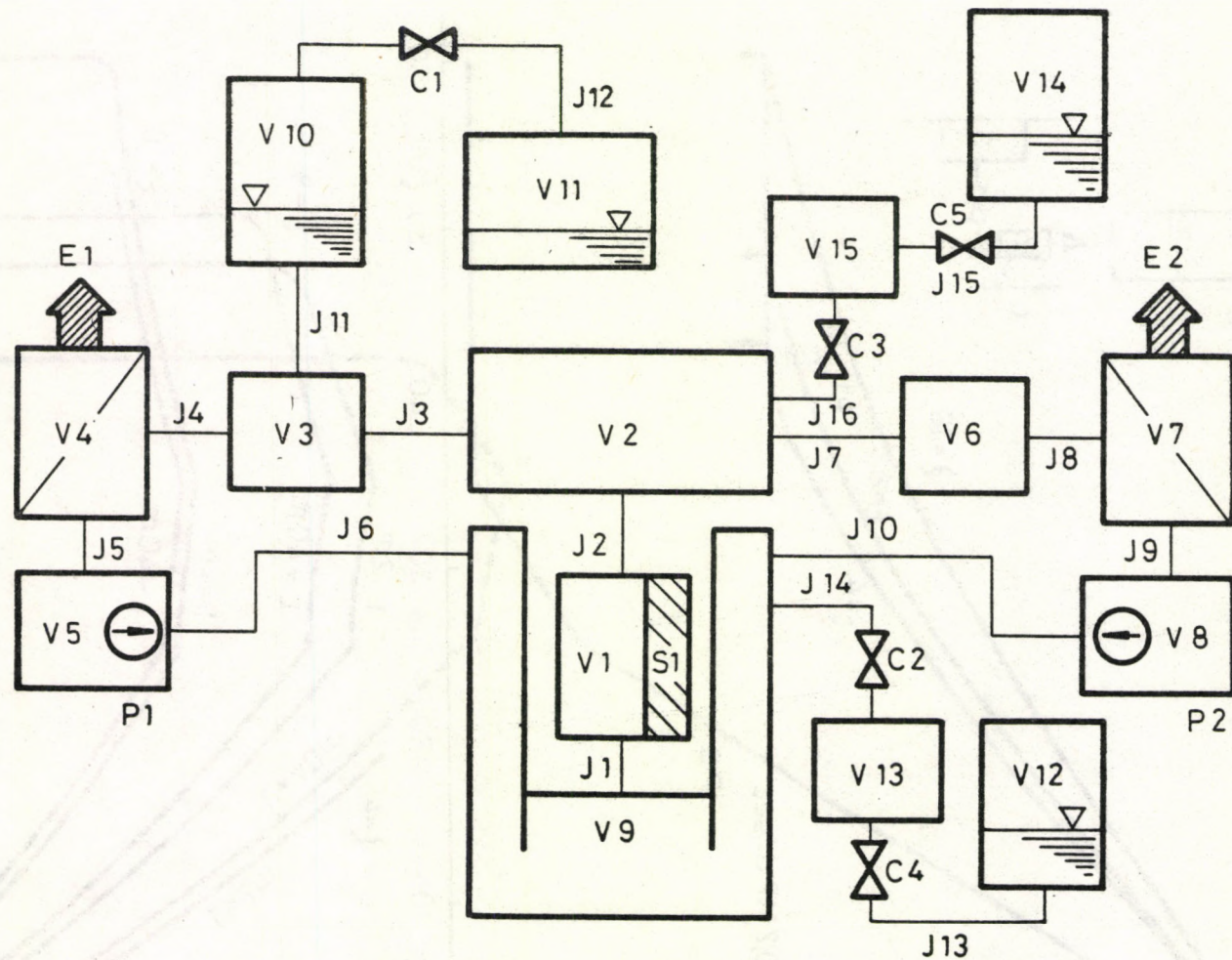
7. F. Kedziur: Untersuchung einer Zweiphasen-Düsenströmung und Überprüfung verschiedener Rechenprogramme anhand der experimentellen Ergebnisse.
KfK 2946 /1980 március/
8. L. Perneczky, W. Sengpiel: Simulation der Blowdown-Phase eines Kühlmittelsstörfalles für einen DWR vom Typ BIBLIS B - Vergleichsrechnungen mit RELAP4/mod2 und RELAP4/mod6.
Kfk-PNS Nr. 518/80. Belső jelentés.
9. L. Perneczky, L. Szabados, J. Vigassy: Models in LOCA Codes BRUCH-D, RELAP4 and TRAC.
У. национальная конференция "Тепло-и ядерноэнергетические проблемы НРБ"
Варна, 21-23. 05. 1981 том. II. стр. 18-28.
10. R. Meyder: SSYST-2, Eingabebeschreibung und Handhabung.
KfK 2966 /1980. november/
11. G. Forti: COSTAX-BOIL - A Computer Programme of the Costanza Series for the Axial Dynamics of the BWR and PWR Nuclear Reactors.
EUR-4497.e - 1970.
12. Vigassy J.: LINCUP - Számítógépi program vizzel moderált atomreaktorok axiális dinamikájának számítására.
KFKI report /megjelenés alatt/.

13. L. Perneczky: Simulation des Kühlmittelverluststör-
falls für einen Druckwasserreaktor vom
Typ WWER-440 im Millisekundenbereich.
Kernenergie Bd. 25., Heft 2, p 64-66,
1982. február.
14. Miettinen J., Perneczky L.: Módosított szivattyú és
gőzfejlesztő modell alkalmazása a Paksi
Atomerőmű biztonsági analiziséhez.
KFKI - 1982 - 09.
15. Ézsöl Gy. és mások: Balesethez vezető üzemzavari ál-
lapotok vizsgálata a Paksi Atomerőmű Bale-
setelhárítási Intézkedési Tervének /BEIT/
elkészítéséhez.
KFKI - 1982 - 11.
16. Perneczky L., Vigassy J.: Hidegütés és szabályozó
köteg kilökődés. I. rész.
KFKI - 1982 - 13.
17. Л. Пренецки, Й. Вигаши: Применение программ BRUCH,
RELAP и LINCUP для расчетов по безопаснос-
ти. Конференция ТЕПЛОФИЗИКА -'82 . Карлови-
Вари, ЧССР . 03-07. 05. 1982 г.
18. T. Siikonen, H. Holmström: Assessment of the Criti-
cal Flow Models of RELAP4/MOD6 and TMOC
Codes. Report of Technical Research
Centre of Finland, Helsinki

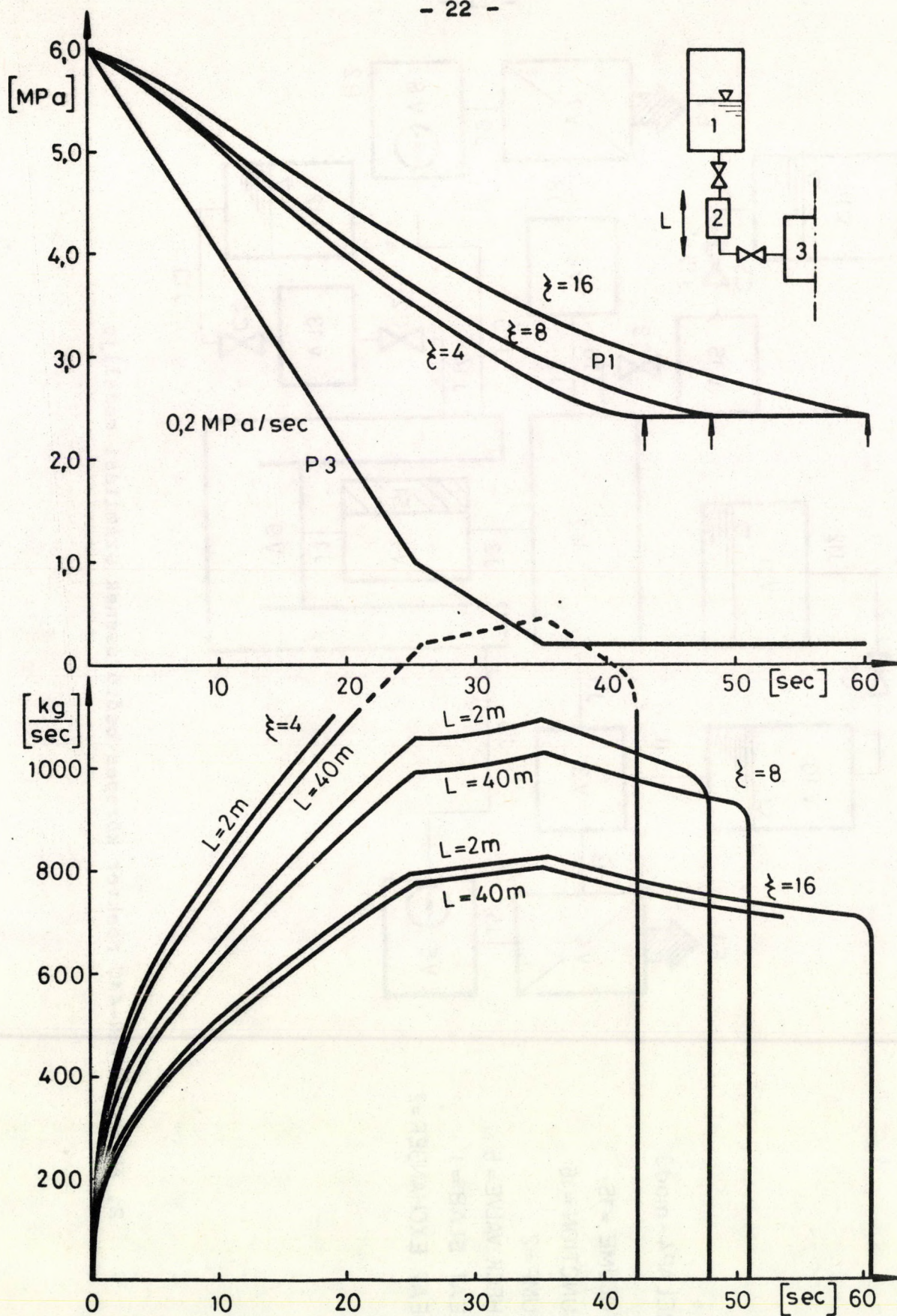
1. ábra A VER-440 reaktor nagykereszmetű csőtörésének számítási modellje.



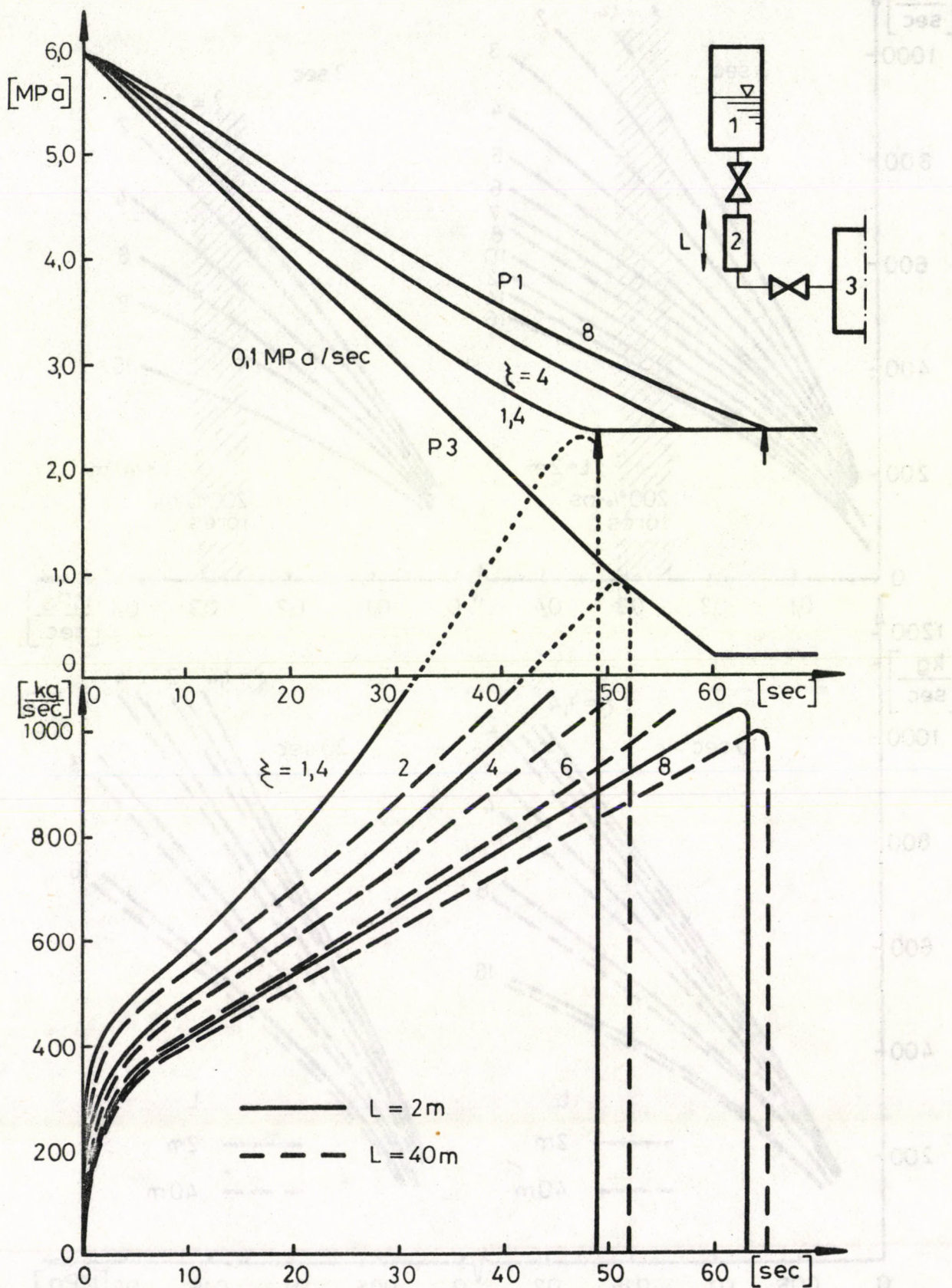
RELAP4-mod 3
 VOLUME = 15
 JUNCTION = 16
 PUMP = 2
 CHECK VALVE = 5
 HEAT SLAB = 1
 HEAT EXCHANGER = 2



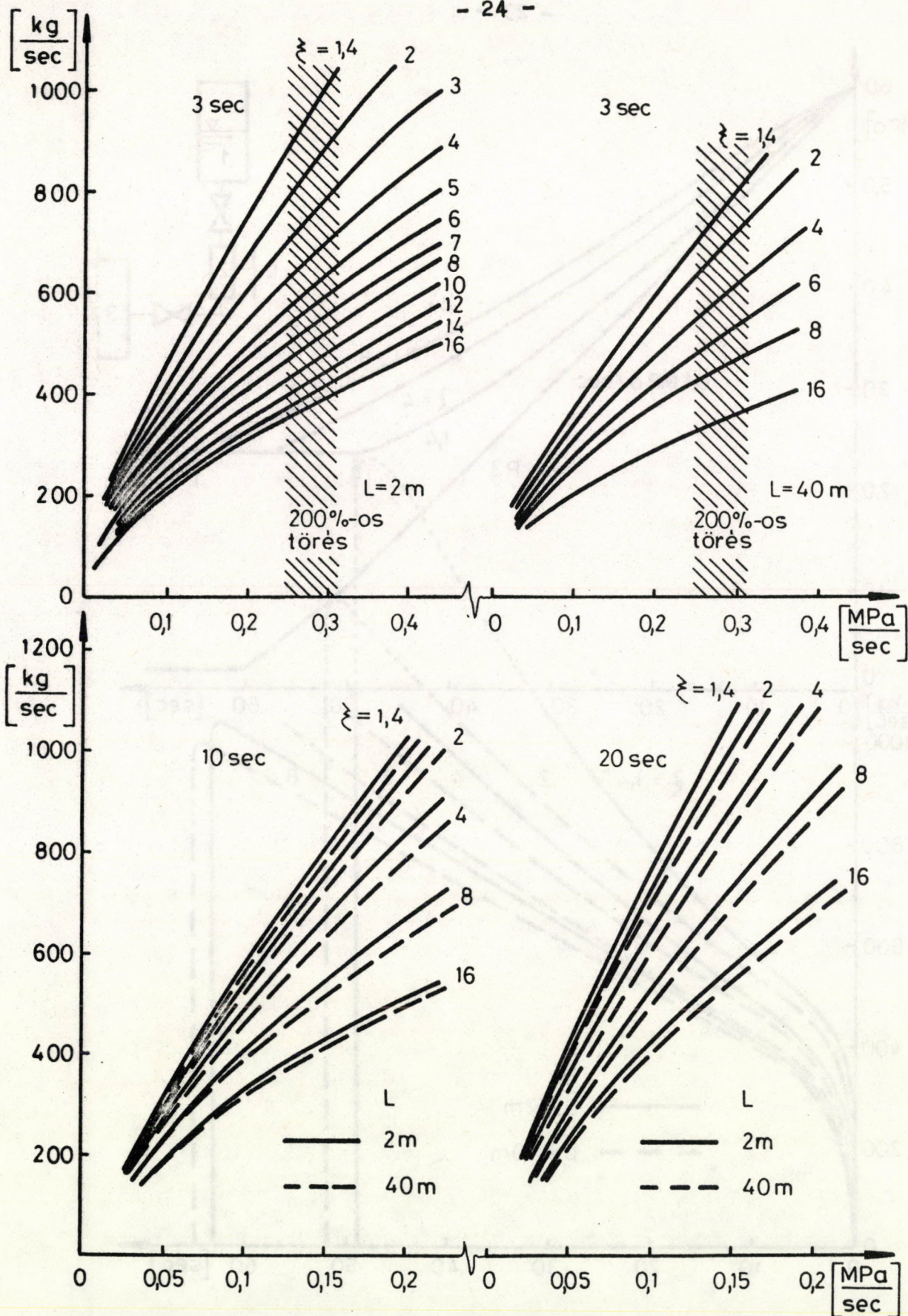
2. ábra A VVER-440 reaktor közepes csőtörésének számítási modellje



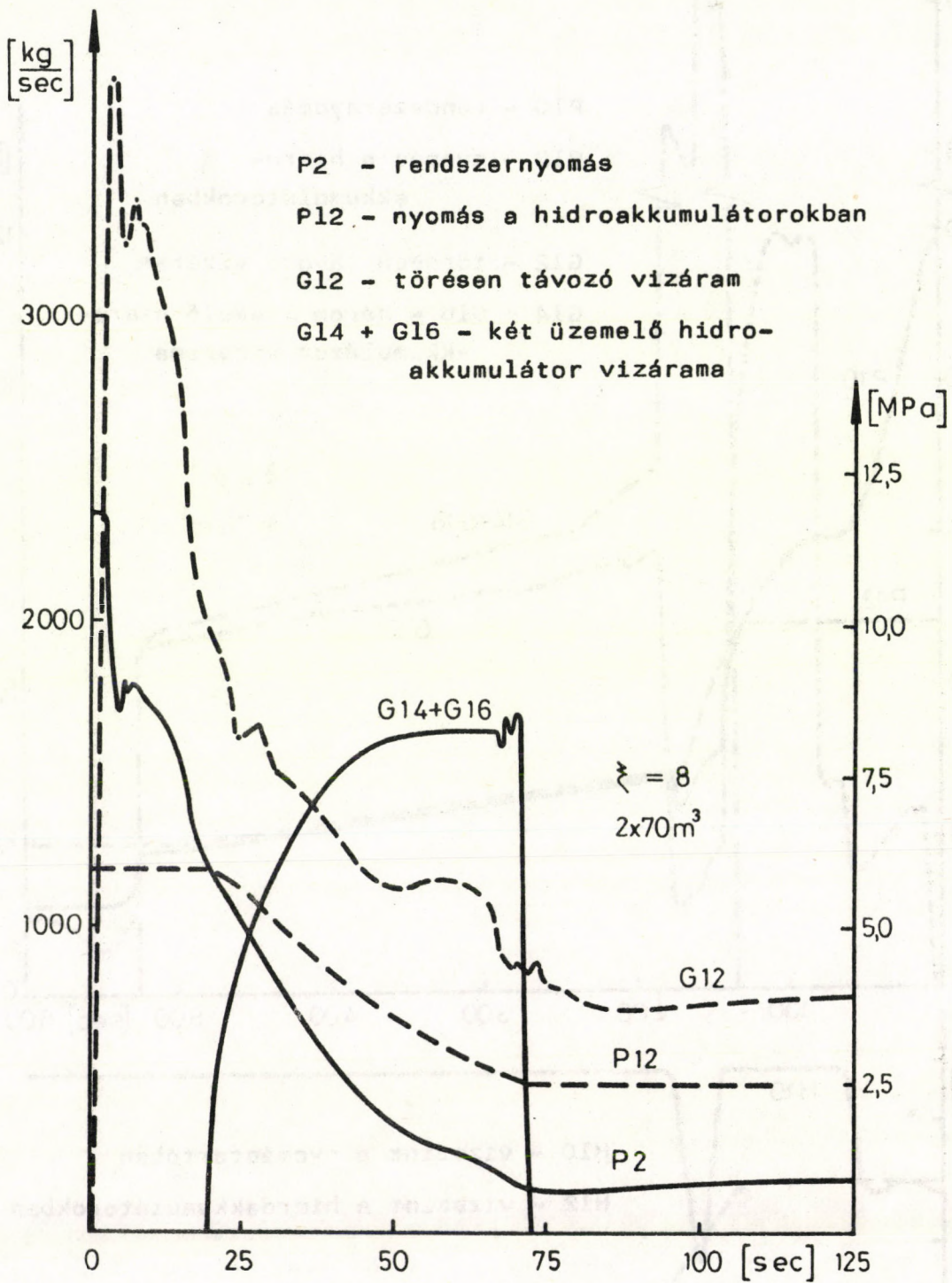
3. ábra A VVER-440 reaktor hidroakkumulátorainak hidraulikai jellemzői 0,2 MPa/sec primerköri nyomásesés esetén



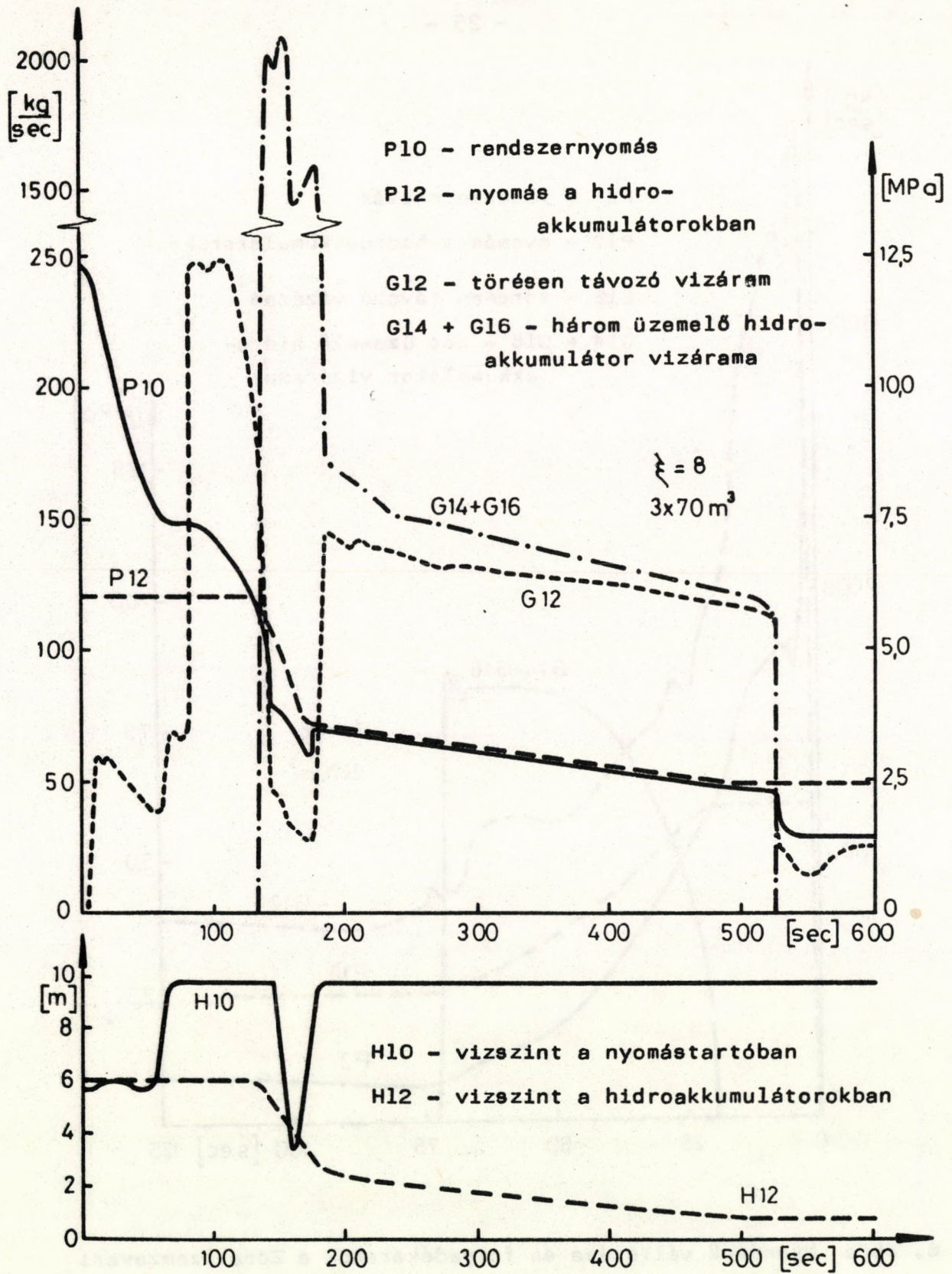
4. ábra A VVER-440 reaktor hidroakkumulátorainak hidraulikai jellemzői $0,1 \text{ MPa/sec}$ primerkörri nyomáscsökkenés esetén



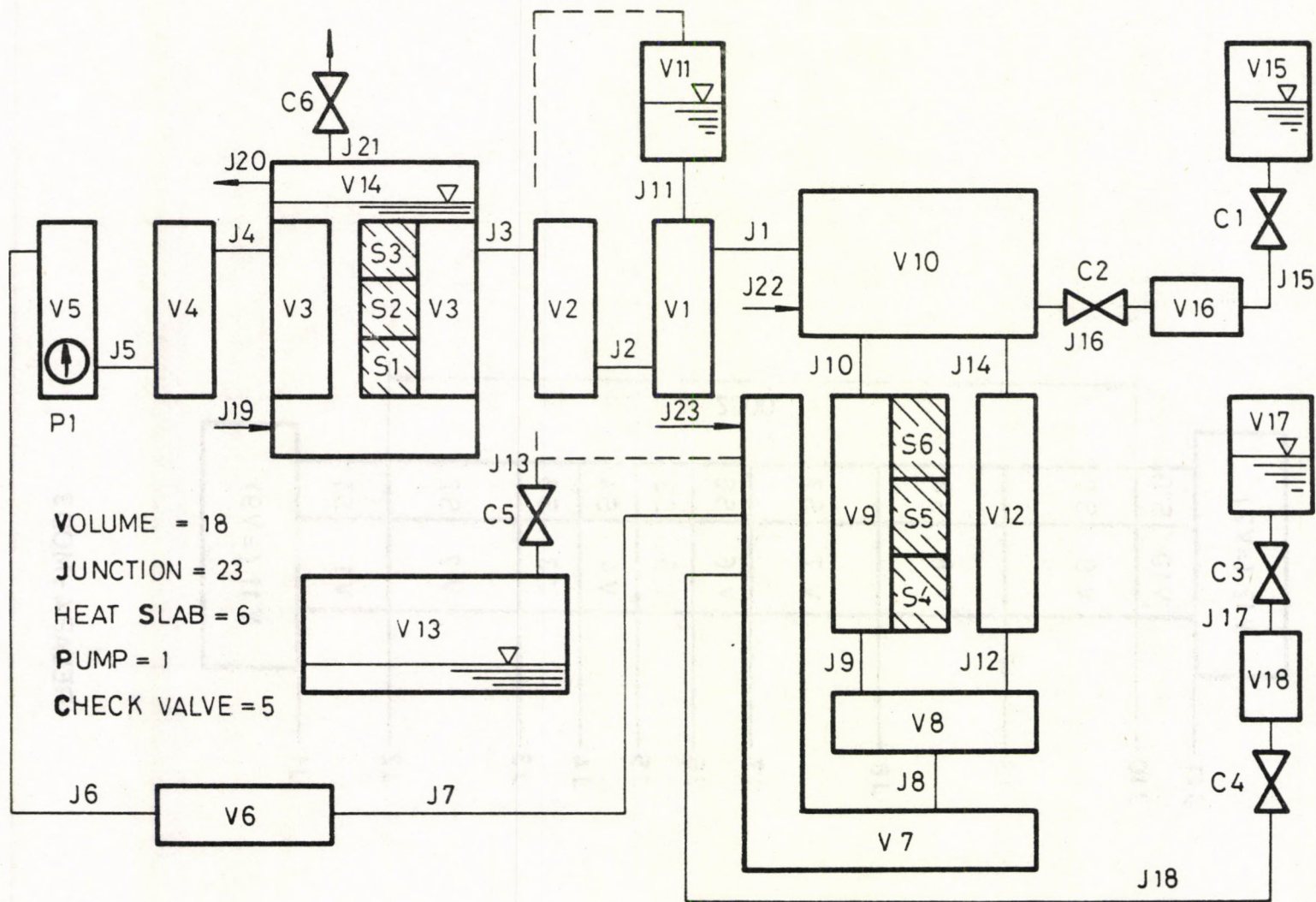
5. ábra A hidroakkumulátorból távozó vízárám különböző időpontokban a primerkörü nyomáscsökkenés függvényében



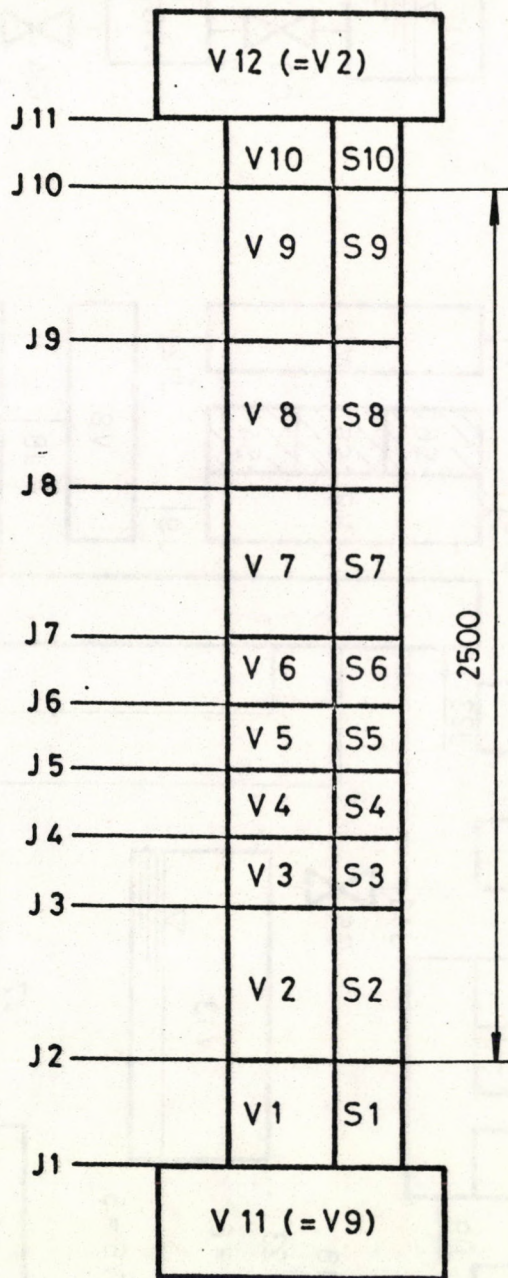
6. ábra Nyomások változása és folyadékáramok a Zóna Üzemzavari Hűtő Rendszer $\phi 273 \times 20$ -as vezetékének törésekor



7. ábra Nyomások, vízszintek és vízárámok a nyomástartó $\varnothing 118 \times 9$ -es hidegvizbefecskendező vezetékének törésekor

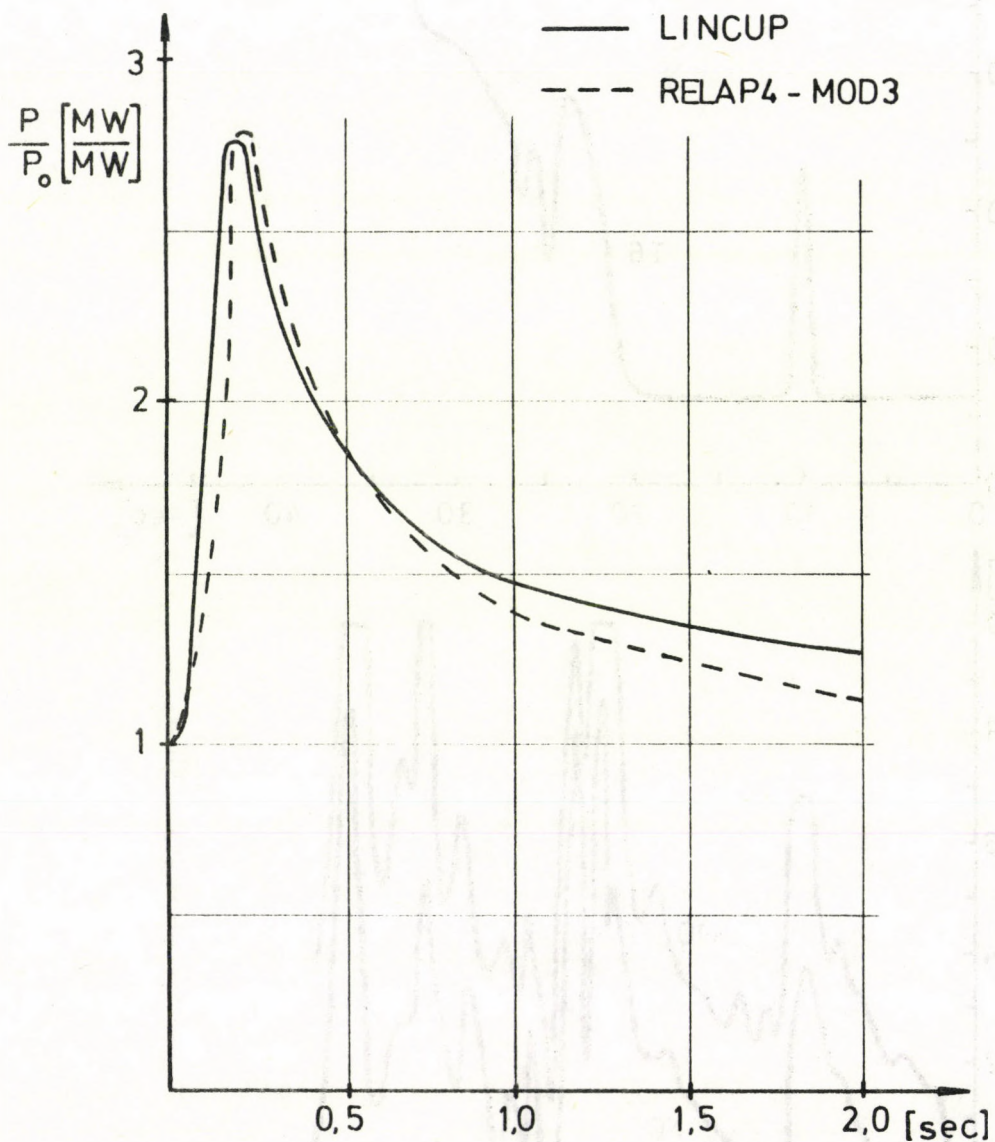


8. ábra A VVER-440 reaktor számítási modellje "vizzsákokkal" és a gőzfejlesztő hővezetési modellezésével

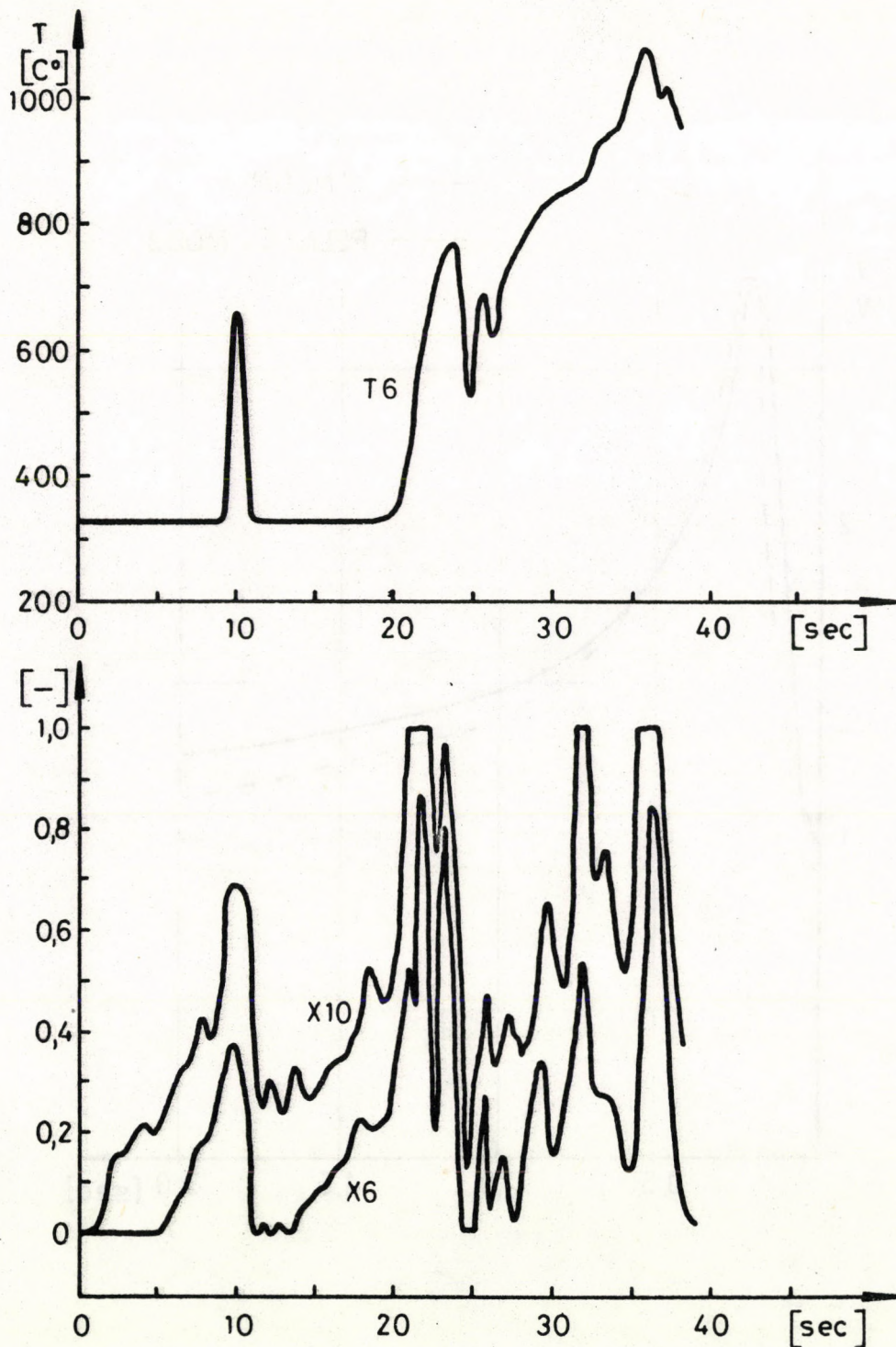


RELAP 4-MOD 3

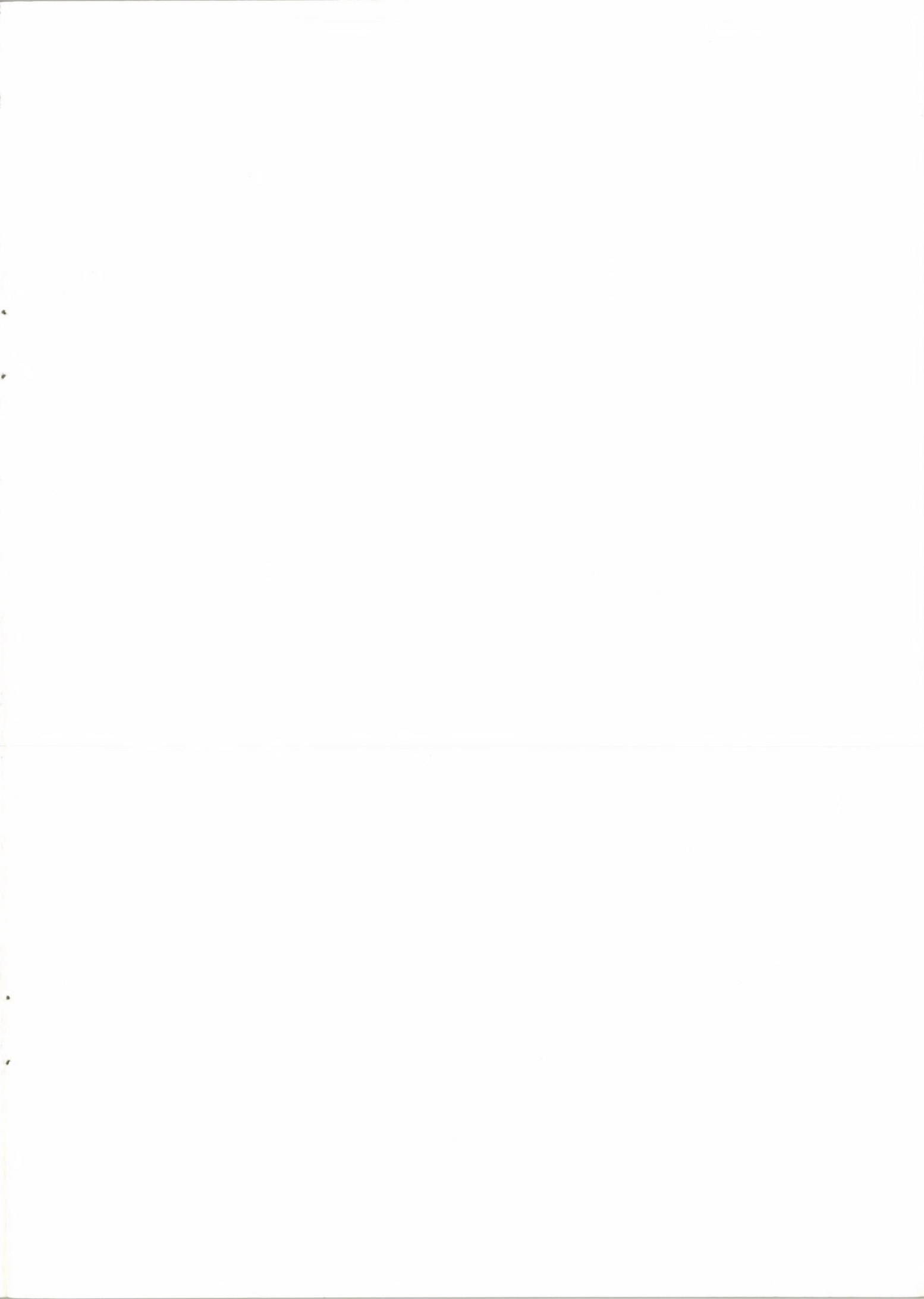
9. ábra Számítási modell a forrócsatorna analízishez



10. ábra A relatív teljesítmény változása szabályozóköteg kilökődés után a RELAP4 és a LINCUP programok szerint



11. ábra A burkolathőmérséklet változása, valamint a gőztartalom alakulása a forrócsatorna 6. és 10. axiális térfogatelemében szabályozóköteg kilökdései



65280

Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Vigassy József
Példányszám: 40 Törzsszám: 82-363
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1982. június hó

