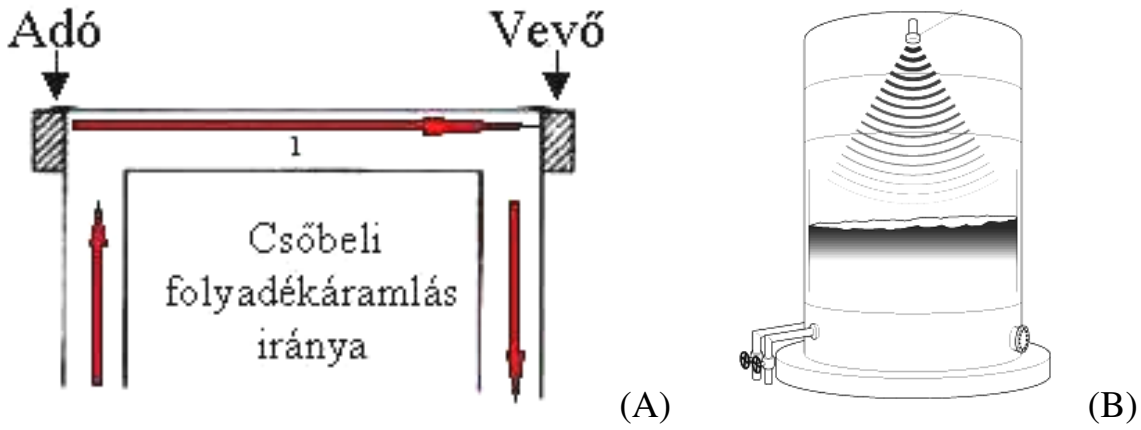
4. AZ ULTRAHANG ALKALMAZÁSAI

4.1. PASSZÍV ULTRAHANG

A passzív felhasználási lehetőségek főleg az anyagvizsgálatokra, a fémekben, sőt a kemény sajtokban és egyéb anyagokban lévő törések, repedések, anyaghibák kimutatására, kőzetüregek, barlangok felkutatására, olajipari alkalmazásokra, geológiai kőzet- és talajréteg analízisre, orvosi képalkotó eljárásokra, napjainkban a szabadidős tevékenységek területén a halfalkák felkutatására, hajózásban a szonártehnológiára koncentrálódnak. A mezőgazdaság és élelmiszeripar is nagy sikerrel alkalmazza a vágóállatok minősítésére (EUROP), mely komoly szelekciós lehetőséget jelent már a vágás előtt. Nem hétköznapi alkalmazás, de például az ultrahangot mikroszkópként is alkalmazzák.

Ezen kívül egyre több cég jelenik meg a hazai piacon az ultrahangos áramlásmérőkkel, vagy tartálybeli folyadékszintmérőkkel, melyekkel a folyamatirányításba is belépett az ultrahang (32. ábra). A felhasználások jórészt az ultrahangsebesség mérésén alapulnak, különböző befolyásoltságok figyelembe vételével.



32. Ábra: Ultrahang a folyamatirányításban (A, áramlásmérő, B, szintmérő)

A 32.A. ábrán adó-vevő elven működő áramlásmérő sematikus ábráját tüntettem fel. Ebben az esetben a csövön lévő mindkét transzdúcer először kibocsát egy rövid impulzust, majd vevő üzemmódban méri a szemben lévő transzdúcerbe való becsapódási időt. Magától értetődően az áramlással szemben érkező impulzus késik, míg az azzal megegyező irányú pedig siet az áramlás nélküli hangsebességhez képest. A késési idő a [7]. egyenlet szerint:

$$\mathbf{t_1=(L/c+w)\ és\ t_2=(L/c-w)} \qquad \mathbf{[7]}$$

A képletben a (t) a hangimpulzus kibocsátásától a beérkezésig eltelt időtartam [s], (L) az úthossz [m], (c) a hangsebesség a mért anyagban [m/s], (w) pedig az áramlási sebesség [m/s]. Innen az áramlási sebesség a [8]. egyenlet szerint:

$$\mathbf{w=L/2*[(1/t_1)-(1/t_2)]} \qquad \mathbf{[8]}$$

Ezen kívül ismerünk még pulzus-visszhang (pulse-echo) és Doppler áramlásmérőket is.

A 32.B. ábrán pulzus-visszhang elven működő tartálybeli szintmagasság érzékelő szenzor sémája látható. A működési elvének lényege, hogy méri a kibocsátott és a beérkezett impulzus között eltelt időintervallumot és mivel ismert a vivőközeg hangsebessége, ezért innen már könnyen meghatározható a szintmagasság, sebesség = út/idő → v = s/t → ultrahangnál c = L/t, innen L = c*t elven, ahonnan a folyadékszint, logikusan a mért L/2.

Modern érzékelési technika még a doppler ultrahang is, ahol a Doppler-effektusnak megfelelően, CW (Continuous Wave = Folyamatos Hullám) módon, különböző határfeltételek figyelembevételével mérhető például a szervek, szövetek és egyéb objektumok mozgása, annak a régen alkalmazott megfigyelésnek a kapcsán, hogy a vizsgált pontnak a vevőhöz való közeledésénél nő a vett frekvencia, a távolodásánál pedig csökken.

4.2. AKTÍV ULTRAHANG

Napjainkban az aktív ultrahang felhasználási területeit maradéktalanul áttekinteni szinte lehetetlen, mivel sorra jelennek meg az egyre újabb és futurisztikusabb alkalmazásai. Ha mégis megpróbáljuk valamilyen rendszer szerint áttekinteni ezt a hihetetlen lendülettel fejlődő tudományt, akkor a nagyobb alkalmazási területek szerint célszerű rendszereznünk azt.

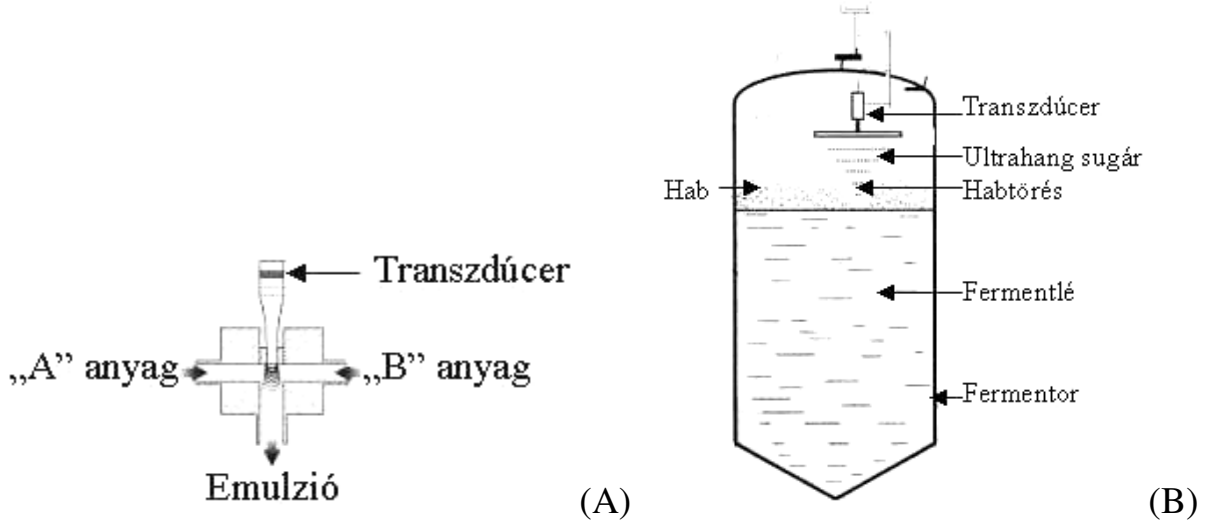
4.2.1. AZ ULTRAHANG BIOTECHNOLÓGIAI ÉS ÉLELMISZERIPARI SZEREPE

4.2.1.1. EMULZIÓK ELŐÁLLÍTÁSA, HABTÖRÉS

A biotechnológia és az élelmiszeripar főleg tisztításra, csírátlanításra, sejt anyagcseretermékek kinyerésére, plakkok diszpergálására, hő és anyagtranszport folyamatok gyorsítására, tartós emulzióképzésre (33.A. ábra) alkalmazza az ultrahangot. Ezen túlmenően, kiterjedten alkalmazzák az aktív ultrahangot keverésre (11. ábra), szemcsék szuszpendáltatására, fermentorok habtörésére (33.B. ábra), folyadékszivattyúként, szelektív szeparációra, a húsok pácolásának gyorsítására, sejtek térbeli rendszerbe hozására gélbe zárás céljára, húsok, csont vágására a szűrés elősegítésére, ultrahang centrifugaként akár önálló, akár kombinált eljárásként.

A 33.A. ábrán, egy ultrahangos emulzióképző berendezés elvi sémája tekinthető meg. Látható az ábrán, hogy a két anyag egymással szemben lép be a rendszerbe, majd a középvonalon, az addigi áramlással merőleges ultrahangsugárban képződik az emulzió. Több ultrahangos emulzió előállító berendezéssel szemben a fenti sémának nagy előnye lehet, hogy az ultrahangsugár hosszabb távon érheti az anyagokat, így sokkal tartósabb emulziók készíthetőek, mint egy olyan berendezésben, ahol az emulzifikálásra fordított úthossz, kizárólag a transzdúcer mechanikai erősítője alatti területre

koncentrálódik, amelyhez hasonlót az EU 0602577A1 számú szabadalma alapján publikáltak már hazánkban.



33. Ábra: Biotechnológiai alkalmazások (A, nagy hatékonyságú emulzifikáló, B, fermentor habtörő)

A 33.B. ábra a biotechnológia egyik kardinális kérdését érinti. Minden biotechnológiai rektortípusnál, így a keverős, air lift, mamut, stb. típusoknál a mai napig probléma a habtörés. Ma leginkább nagy sebességgel forgatott habtörő tárcsák, illetve a felületi feszültséget növelő olajok terjedtek el a habzás csökkentésére. Minden alkalmazott megoldás magától értetődően specifikus előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik, így például igaz, hogy a mikroorganizmusok szubsztrátként hasznosítják az olajokat, azonban ezekből mindig újabb mennyiségek beadagolására van szükség a habzás megszüntetésére, tehát hosszú távon igen drága, mivel állandó költségnek számolható, illetve nem lenne szükséges jelenléte a fermentációhoz. Az olajos habzáscsökkentéshez még hozzá tartozik, hogy megfelelő adagoló és szabályozó berendezések kapcsolódnak a fermentációs rendszerhez, ami szintén drágítja a teljes rendszer bekerülését.

A 33.B. ábrán felvázolt berendezés, a fermentáció során keletkező habot ultrahang segítségével mintegy szétrobbantja a hangsugár alatt, melyet a habréteg felett egy félköríven mozgó szerkezeten helyeznek el. A bekerülési és elenyésző elektromos áram felhasználási költségein kívül semmilyen járulékos kiadással nem kell számolni az ultrahangos habtörő alkalmazásakor, valamint nem kerül drága és felesleges idegen anyag a fermentlébe, illetve az eszköz szervesen beleilleszthető a fermentációs eljárásba (tisztíthatóság, stb.) is.

A fent bemutatott eljárás a fermentációs iparban hosszú távon innovatív, az ipari technológiát, illetve az oktatást támogató, hazánkban még nem elterjedt habtörési módszer.

4.2.1.2. SZEPARÁCIÓ, ÜLEPÍTÉS

További biotechnológiai felhasználási lehetősége az ultrahangnak az emulziók és szuszpenziók ülepítésének gyorsítása (34. ábra). Az Európai Unióban néhány évvel ezelőtt több kutatóintézet és egyetem összefogásával EuroUltraSonoSep néven TMR programot indítottak a biotechnológiai diszperzió disszociáció ultrahangos megoldására, emulziók és szuszpenziók leválasztására, illetve szelektív akusztikai szeparációra. A programban különböző minőségi típusú, például élő és holt, illetve eltérő fajú sejtek szétválasztásának megoldása is cél volt (Benes et al., 1998). A program sikeres volt, melynek eredményeiről meglehetősen sok, a legkülönbözőbb ultrahang és biotechnológiai szakfolyóiratokban, illetve konferenciákon történtek publikációk. A program eredményei a mai napig hozzáférhetőek, azonban alkalmazásukat tekintve iparilag most vannak elterjedőben. Az eredmények alapján megjósolható, hogy az elkövetkezendő években világszerte ultrahangos fellendülésre lehet számítani az ülepítési és a szeparációs technikában, mivel olyan nagyhatékonyságú berendezésekről van szó, ahol mozgó alkatrész, illetve fizikai, kémiai biológiai kontamináció nélkül végezhető el az ülepítés, a

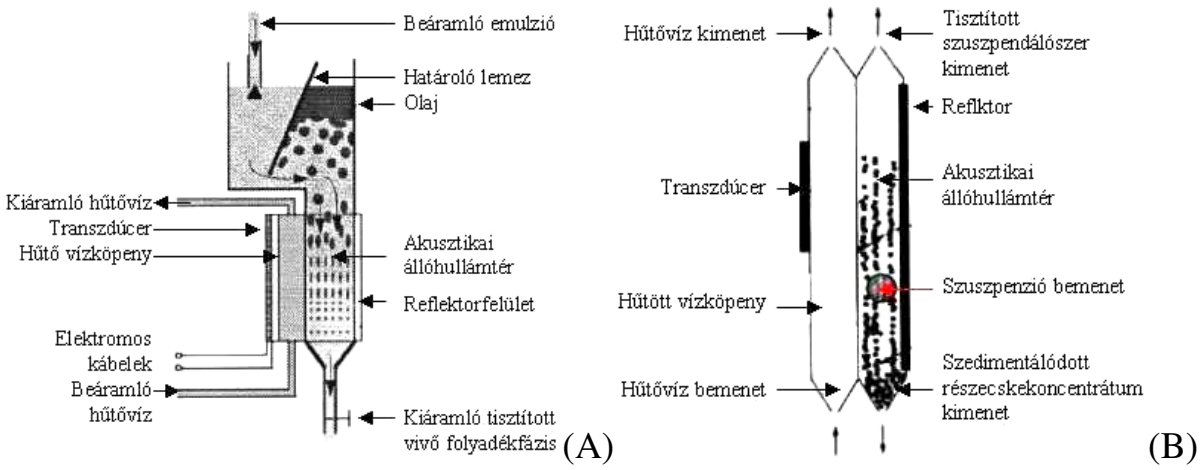
szeparáció, akár szelektív eljárásként is, folyamatosan időszakos leállások nélkül.

A 34.A és B. ábrán sematikusan felvillantott technológiát főleg a szennyvíz, környezet-, illetve a fermentációs-, és biotechnológiai ipar technológiai újításai iránt érdeklődők figyelmébe ajánlom, mivel a bekerülési költségeken, illetve a nem túlságosan jelentős elektromos energia igényen kívül semmilyen járulékos költséggel nem rendelkeznek ezek a nagy hatékonyságú, folyamatos üzemben alkalmazható szeparációs és ülepítési technológiák.

A 34.A és B. ábrán bemutatott technika lényege, hogy speciálisan tervezett akusztikai kamrában állóhullámot kialakítva történik meg az eltérő fizikai tulajdonságú közegek szétválasztása, a vivőközeghez képesti sűrűség, fajsúly, kompresszibiltás különbség, alaki részecske jellemzők, stb. alapján. A technológia által kihasznált jelenséget többek között már Bondy és Söllner (1935) és Tarnóczy (1963) is megfogalmazta korai munkájában. Mégpedig ennek lényege, hogy az állóhullámú interferenciatérben összecsapódott anyagok közül, ha a diszpergált fázis fajsúlya kisebb a diszpergáló fázisénál, akkor az a kimozdulási csomósíkba koagulál, és a felhajtóerő egy bizonyos értéke felett a felszínre vándorol, illetve fordított esetben a nyomási csomósíkba koagulál és az aljzatra szedimentálódik.

A 2.1.4. fejezetben a levitációnál azért nem érvényesült ez a kicsapó hatás, mivel az akusztikai állóhullámban kialakult csomósíkon belül nem volt több anyag az összecsapódáshoz és kiülepedéshez. A 2.4. fejezetben szintén utaltam már arra, hogy a szonolumineszcencia jelenségét mutató buborékok, az állóhullám sebességi csomósíkjaiban csapdázódnak, mivel a fajsúlyuk logikusan kisebb, mint a vivőközeg. Az akusztikai szeparációs rendszerek tervezése igen bonyolult és sok összefüggést vesz figyelembe, azonban ezáltal alkalmazásuk során igen megbízhatóak e berendezések. A 20. ábrán jól látható az akusztikai kavitáció és az állóhullám, mint a jelen alkalmazás kulcsjelenségének szemcsekoncentrációra vonatkozó határvonala modellanyagok esetén. A

kavitációs határkoncentráció vizsgálat eredményei alapján meghatározható, hogy milyen szemcsekoncentráció szükséges egy adott intenzitás mellett, vagy milyen intenzitás szükséges egy adott szemcsekoncentráció mellett az ultrahangtérben, hogy akusztikai állóhullám, vagy, akusztikai kavitáció alakulhasson ki. A vizsgálat folyománya, hogy amennyiben állóhullám van, illetve azt alakítok ki a rendszerben, akkor a szeparáció és szedimentáció, amikor viszont kavitáció dominál a hangtérben, akkor a keverés, az emulgeálás és a szuszpendálás valósítható meg az ultrahang segítségével. Ez a mérés pedig alapvető az ultrahang célirányos kiaknázása érdekében. Abban az esetben, ha a szükséges fizikai tényezőket optimalizáljuk, nagyon jól működő berendezésekhez juthatunk, amely konkurense és kiegészítője lehet bármilyen ma alkalmazott ülepítési technológiának. A szennyvíz és a fermentációs ipar iránt érdeklődők számára ismételten felhívom a figyelmet arra, hogy mivel a technológiában nem található mozgó alkatrész, nincs felesleges kontamináció, nincs cserélendő berendezési egység, nincs felesleges segédanyag felhasználás, illetve hatékonyságban bármely jelenleg alkalmazott folyamatos szeparációs eljárással felveszi a versenyt és viszonylag olcsó, ezért az új idők befutója lehet világszinten e technológia.



34. Ábra: Emulzió és szuszpenzió szeparációja (disszociációja) ultrahanggal

(A, emulzió, B, szuszpenzió szeparáció)

4.2.1.2.1. EMULZIÓK AKUSZTIKAI SZEPARÁCIÓJA

A 34.A. ábrán megfigyelhető, hogy az emulzió egy csövön keresztül, a berendezés felső részén áramlik be a rendszerbe, majd egy érkező rezervoárba jut. Innen beáramlik az akusztikai állóhullámtérbe, ahol az emulgeált anyag összecsapódik (koagulál) nagyobb cseppekké, és a vivő és az emulgeált fázis közötti fajsúlykülönbség miatt, a felhajtóerő a nagy méretű cseppeket, az akusztikai erőtérből kiszakítva a felszínre emeli. Ez a felszínre vándorlás akkor következhet be, ha a koagulált emulgált anyag cseppjein ébredő felhajtóerő, a cseppek méretének növekedése által meghaladja a cseppeket csapdázó akusztikai erőtér nagyságát, amihez még hozzájárul az, hogy a cseppek túlnyúlnak, koagulációjuk folytán túlnövekednek a sebességi csomósíkok befogó határain. A beáramló diszperzióban lévő emulgeált cseppek a felhajtóerő által nem tudnak a felszínre vándorolni a hidrodinamikai áramlással szemben, a készülékben való átáramlási időintervallum alatt. Az akusztikai erőtér felel a cseppek sebességi csomósíkokba rendezésért, majd a cseppek összecsapódásáért, továbbá a viszkózus erők egyensúlyozásáért, ami az áramlás kompenzálására szolgál, a cseppek hangtérből való kiáramlásának megakadályozásáért. Az apróbb emulgeált anyag cseppek ezáltal nem tudnak áthaladni a rendszeren, mert ezekre az akusztikai erőtér állóhullámbeli erői intenzíven hatnak, mégpedig azok, amelyek a tanulmány első részében, az akusztikai levitáció jelenségét is támogatták. Miután az emulgeált anyag a felszínre vándorolt, az onnan leszivattyúzható, leereszthető, szűrhető, feldolgozható. A tisztított emulgeálószer a rendszer alsó részén távozik.

Nagyon lényeges a transzdúcer és az akusztikai állóhullámtér között található hűtővíz. Ennek a hőmérséklet stabilizálásnak (hűtésnek) a szerepe, hogy a rendszert állandó hőmérsékleten tartsa. De miért? A magyarázat egyszerű, ha a hőmérséklet változik, akkor megváltozik az anyagok hangvezetési sebessége is, emiatt mivel a frekvencia állandó, könnyen belátható,

hogy változik a hullámhossz is. Márpedig ha változik a hullámhossz, akkor változik az állóhullám kialakulásához szükséges adó-reflektorfelület távolság is. Ezáltal amennyiben a hőmérséklet változna, akkor a rendszer lelkének számító állóhullám összeomlana, vagy az emulzió cseppjeire (vagy diszperzió szemcséire) ható akusztikai erőtér nagysága végzetesen lecsökkenne. Ha pedig lecsökkenne a cseppekre ható akusztikai erő, akkor azok mindenféle koagulálás nélkül az eredeti állapotban, a rendszeren lévő alsó kivezető csapon emulzióként távoznának, amely csap elméletileg a tisztított emulgeálószer kitermelésére szolgál. A hőmérséklet változásakor vagy a beáramló anyag hőmérsékletét kell visszaállítani a szükséges értékre, vagy a adó-reflektor távolságát kellene folyamatosan állíthatóvá tenni, mivel a frekvenciaállítás lehetősége a ma alkalmazott nagyteljesítményű egy adott frekvenciára hangolt transzdúcereknél nem biztosított, mely utóbbi elképzelés technológiai kialakítása megoldható, de nem kifizetődő megoldás. A stabil hőmérséklet tehát a rendszer egyik gyengesége lehetne, ha erre nem készülnénk fel technológiailag, annál is inkább, mivel a transzdúcerek hatásfoka hozzávetőleg 50%-os, vagyis a rákapcsolt teljesítmény fele rögtön hővé alakul.

4.2.1.2.1.1. A DISZPERGÁLT RÉSZECSKÉN ÉBREDŐ AKUSZTIKAI ERŐ MEGHATÁROZÁSA

Könnyebben belátható a hőmérséklet – hangsebesség – hullámhossz – részecskét csapdázó akusztikai erőtér intenzitásának összefüggése, az akusztikai állóhullámtérben található részecskén ébredő akusztikai sugárzási erő nagyságának meghatározásán keresztül. A legújabb kutatások szerint, a diszpergált részecskén állóhullámban ébredő akusztikai sugárzási erő meghatározására a legáltalánosabb a [9]. képlet:

$$\mathbf{F_{acoust}=C_a*I_a*r^3*\sin(2k_z*z)} \qquad \mathbf{[9]}$$

A képletben a (F_{acoust}) az akusztikai erő (pN), (I_a) az akusztikai intenzitás, (r) a részecske sugár, (k_z) a hullámszám ($2\pi/\lambda$), és (C_a) pedig a rendszer akusztikai tulajdonságaitól függő konstans, (z) pedig a szeparátor kapilláris, vagy kamra középtengelyétől mért távolság. Látható, hogy a hullámszámban szerepel a hőmérsékletfüggő hangsebesség (c) által befolyásolt hullámhossz ($\lambda=c/f$).

A viszkózus és az akusztikai erő egymásra ellentétesen hatnak, így az akusztikai erőből még le kell vonni a viszkózus erőt. (F_{acoust}- F_{visc}). A viszkózus erő meghatározásának a módja a [10]. képlet szerint:

$$\mathbf{F_{visc}=C_v*v*r} \qquad \mathbf{[10]}$$

Ahol a (C_v) konstans a folyadék viszkozitásának a függvénye, illetve (v) a részecskék sebessége. Minden bizonnyal, akkor ha a teljes folyamatot vizsgáljuk, figyelembe kell még venni a gravitáció, a felhajtóerő, stb. hatását is a koagulált cseppekre. A rendszerben az akusztikai és a viszkózus erő között a részecskén egyensúly jön létre.

4.2.1.2.2. SZUSZPENZIÓK AKUSZTIKAI ÜLEPÍTÉSE

A 34.B. ábra egy ultrahangos szuszpenzió ülepítő berendezés elvi sémáját mutatja be. Erre a rendszerre is ugyanazok a fizikai törvényszerűségek érvényesek, mint az előzőre (4.2.1.2.1.1. fejezet), mindössze annyi a különbség, hogy a szuszpendált részecskék a nyomási csomósíkban koagulálnak, illetve a készülék aljában szedimentálódnak, majd a koncentrált szuszpenziónak innen történik meg a leeresztése, eltávolítása, kitermelése. Látható, hogy ebben az esetben közvetlenül az akusztikai állóhullámtérbe történik meg a nyers szuszpenzió bevezetése, azonban azzal a distinkcióval, hogy lamináris hidrodinamikai áramlás mellett, a kialakult részecskepászmákra párhuzamosan történik meg a betáplálás. Az akusztikai erőtérrel párhuzamos betáplálás oka,

hogy az akusztikai erőtér által kialakított pászmák, átfolyó rendszerű berendezésben történő stabilizálása érdekében a hidrodinamikai erő által mozgatott nyers szuszpenziót nem vezethetjük neki rögtön merőlegesen a sávoknak, mivel azok rögtön feltörnének, a pászmák feltörése pedig az apróbb szuszpendált szemcsék reszuszpendálását okozná. A koagulált részecskéknek folyamatosan nő a fajlagos sűrűségük és méretük a koncentrálódás során (6. ábra), emiatt az agglomerátum egyre nagyobb része nyúlik túl a csapdázó erővel bíró nyomási csomósíkon. A szemcséken ébredő gravitációs erőnek, az akusztikai erő nagyságát meghaladó mértékénél, a csapdázott részecskékből koncentrálódott szemcse agglomerátumok a készülékaljban kiülepednek.

Hasonló kialakítású berendezésekkel megoldható a szelektív szeparáció is a hidrodinamikai és akusztikai erőtér fizikai kölcsönhatására a szemcsék röppályája alapján. A szelektív szeparáció során eltérő fizikai tulajdonságú szemcséket tudunk konzekvensen elválasztani egymástól. Ezek az eltérő fizikai tulajdonságok például a sűrűség, vivőközeghez és egymáshoz viszonyított kompresszibilitás különbség, a geometriai felépítés, méret, alak, felület, stb. Természetesen egy komplex diszperzió esetén megvalósítható a 34. ábra berendezéseinek kapcsolása is, ahol az emulgeált és a szuszpendált részecskék leválasztása sorba kapcsolt rendszerben megvalósítható.

4.2.1.3. A SEJTEK AKUSZTIKAI STIMULÁCIÓJA (SZAPORODÁS-, ÉS TERMÉKKÉPZÉS SERKENTÉS)

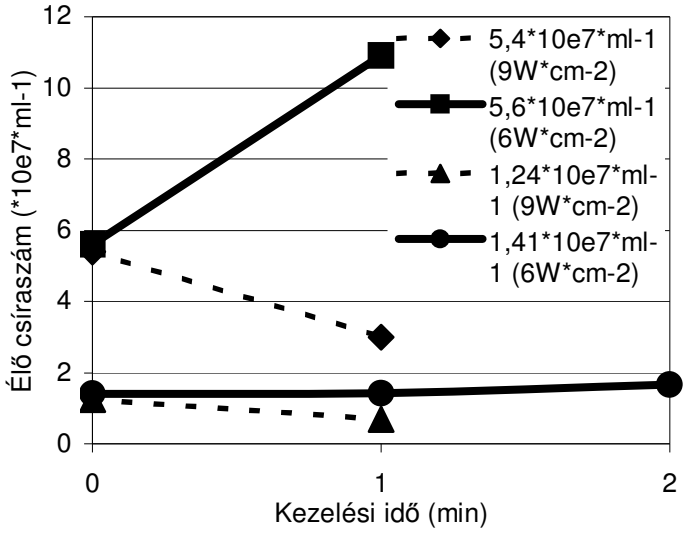
Izgalmas új terület a sejtek fermentációs- és szaporodóképességének fokozása ultrahang segítségével (33.A. ábra), melyről számos jó színvonalú tudományos cikk született az elmúlt néhány évben és többek között a mi kutatásaink is erre irányulnak. Kutatásaink során gyakran tapasztaltuk, hogy bizonyos (általában minden vizsgált sejttípus esetén más) intenzitású ultrahang besugárzás serkentően hat egy adott sejttípusra. Izgalmas kérdés ez, mert az

ultrahangot általában a csírák elölésére használjuk és így például a szaporodásserkentő stimuláló hatás váratlan, meglepő eredmény lehet, abban az esetben, ha a két hatás kialakulása között wattnyi, vagy még inkább akkor, ha milliwattnyi ultrahang intenzitáskülönbség van. Igaz az is, hogy ezek a hatások általában összefüggnek az ultrahangtérben tapasztalható akusztikai jelenségekkel, amelyek határzónája nagyon sok fizikai tényezőtől függ, mely tényezők a tanulmány első felében kerültek részletesebben tárgyalásra. Az akusztikai jelenségek (kavitáció, állóhullám, akusztikai áramlás) küszöbértékében alapvető szerepet játszik a sejtkoncentráció (20. ábra), az oldott oxigén szint, az oldott ionok mennyisége és minősége, a kavitációs magok típusa, stb. Az is megfigyelhető, hogy egy bizonyos akusztikai jelenség, így például a stabil kavitáció mellett alacsonyabb intenzitás mellett stimuláló, míg magasabb intenzitásoknál inkább a sejtroncsoló hatás érvényesül.

4.2.1.3.1. STIMULÁCIÓS ÉS GÁTLÓ VIZSGÁLATOK

Pseudomonas aeruginosa baktériummal vizsgáltuk ezt az ultrahang teljesítményfüggő stimuláló és pusztító (citolítikus) hatást, melyet még a mikroorganizmus koncentrációjával is összefüggésbe hoztunk (35. ábra). Az látható a 35. ábrán, hogy mind a magasabb $5{,}4*10^7$/ml, mind az alacsonyabb $1{,}2*10^7$/ml körüli kiinduló csíraszámú minták esetében érvényesült a stabil kavitáció miatt, az alacsonyabb 6W/cm^2 ultrahang teljesítmény melletti serkentő, míg a magasabb 9W/cm^2 melletti gátló, pusztító, citolítikus hatás. Ez azt jelenti, hogy az ultrahang segítségével kialakítható a szelektív fizikai kezelés, tehát eldönthető, hogy milyen irányú és hogy milyen mértékű sejtszám változás kívánatos, egy adott sejttípus esetében, vagyis fajon belül. Nem lehet eléggé kihangsúlyozni, hogy micsoda gazdasági jelentősége van egy olyan fizikai kezelésnek, mely akár 10%-os hozamnövekményt eredményez, akár a

sejttömeg képződési sebességben, vagy kihozatalban (SCP), vagy akár a termékképzésben, vagy a szubsztrátkonvezióban.



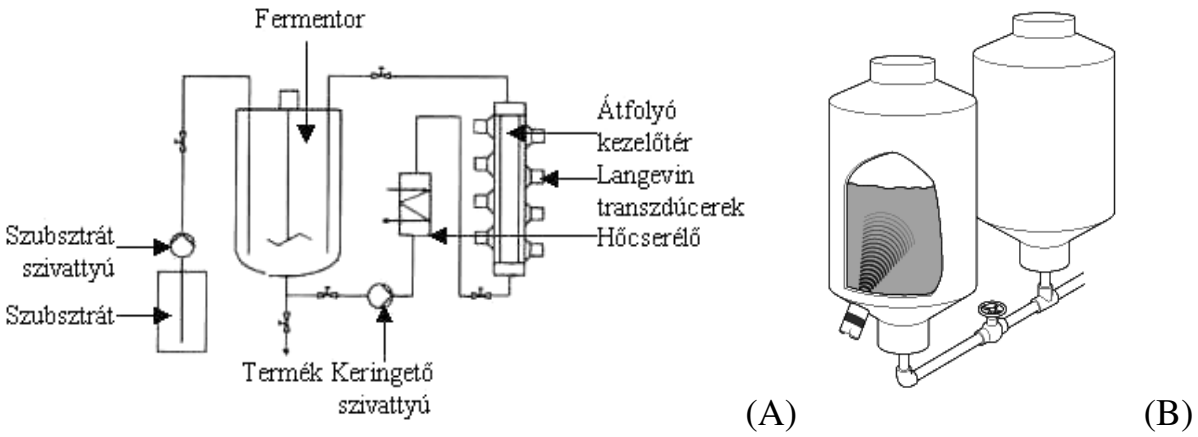
35. Ábra: Élő csíraszámok alakulása *Pseudomonas aeruginosa* baktérium esetén különböző ultrahang intenzitású kezelés hatására stabil kavitáció mellett.

Nagyon hasonló hatást tapasztaltunk a vetőmagok csírázási erélyének fokozása, illetve csökkentése kapcsán. Ebben az esetben még további vizsgálatok tárgyát képezi, hogy a tapasztalt csírázási erélybeli változások, vagyis a stimulációs hatás hosszútávon kódolódik-e a vetőmagvakban. Az ultrahang által stimulált vetőmagok, mint a vetőmagipar egyik nemesítést és agronómiát kiegészítő eljárásaként jöhetnek számításba, a nagyobb használati érték megteremtése céljából.

4.2.1.3.2. FOLYAMATOS ÉS SZAKASZOS AKUSZTIKAI STIMULÁCIÓ

Visszatérve egy kisebb kitérő erejéig a biotechnológiához, tekintsük meg a 36. ábrát! A 36.A. ábra egy folyamatos ultrahang besugárzó rendszert mutat be. Ezt a rendszert az előzőekben bemutatott sejt szaporodó-, és fermentációs

képesség fokozása céljából alkalmazzák. A szakirodalom szerint, mind a szaporodásserkentésben, mind a fermentációs képesség fokozásban jelentős hatása van az ultrahangnak. Természetesen az alkalmazáshoz megfelelően, az adott biológiai rendszernek megfelelő paramétereket kell biztosítani. Ezek a függő változók a sejtkoncentráció, a valódi oldat töménysége, a fermentlében kialakuló hangsebesség, az oldott gáz tartalom, a kialakítandó akusztikai jelenség, stb. Könnyű belátni, hogy akár a technológiai forgó gyorsulása, akár a kihozatal (SCP, anyagcseretermékek, stb.), már akár az előzőekben is említett 10%-os növekedése milyen gazdasági haszonnal jár és ez milyen versenyhelyzet előnyt jelent. A berendezésekben nincs mozgó, eltömődő, kopó, cserélendő alkatrész, illetve a nem túl jelentős elektromos áram szükségleten kívül semmilyen más állandó költség sincsen. A 36. ábra alapján ez az eljárás alkalmazható akár folyamatos, vagy akár szakaszos töltő-ürítő rendszerben is. Megfontolandó szempont az is, hogy a rendszer kialakítható a 34. ábrán bemutatott szeparációs felépítmény szerves részeként, nem szeparációs, hanem cirkulációs módozatban. Az élelmiszeriparban az ultrahang bizonyítottan alkalmazható továbbá az alkoholos italok érésének-gyorsítására, így a sör- és boripar egyre gyakrabban alkalmazza, mivel gyorsul a technológiai forgó, illetve a tárolókapacitás lekötöttsége. A 36.A. ábrán található hőcserélő nem a hangsebesség stabilizálását szolgálja, hanem a sejtek által termelt hő elszállításáért felel. Ebben az esetben a hangsebesség nem lényeges, mivel a hatást az ultrahang magas intenzitása miatt kialakuló stabil, illetve tranziens kavitációs buborékok alakítják ki. Persze akkor, ha egy menetben történne a szeparáció, illetve az ülepítés, valamint a stimuláció, akkor a tervezett kamrától nem lehetne eltekinteni, azonban ebben a munkafázisban a kamra geometriájának mindössze anyagtovábbítási funkciója lenne.



36. Ábra: Az ultrahang fermentációs alkalmazásai (A, on-line alkalmazás (Forrás: Schläfer, O. et. al., 2000) B, batch alkalmazás)

A 36.A. ábrán látható folyamatos stimuláció, a fermentor anyagáramába mellékágon kapcsolt, sterilizálható átfolyó kamrájában történik meg. Az ultrahang kezelőtérben való tartózkodási időeloszlása jól meghatározható az egyes sejteknek, ezért célzott dózisú kezelésben részesíthető az ismert mennyiségű „sejthalmaz”. Tulajdonképpen tehát ez is egy szakaszos fermentáció, csak a kezelés tehető így folyamatossá és jól tervezhetővé.

A 36.B. ábrán a fermentorban helyezik el a sugárzót, vagy transzdúcert, amely az intenzitásától függő mértékben, a kavitáció hatására járulékosan kialakuló akusztikai áramlás segítségével keveri is a folyadékot. A keveredés hatására a kavitációs zónába kerülő sejtek a tartózkodási időeloszlásuknak megfelelő minőségű és mértékű sejtbiológiai hatásban részesülnek. Ebben az esetben is számítható a bejuttatott egy sejtre, vagy 1 milliliterre vett ultrahangdózis, amelyből már a biológiai hatás meghatározható. Azonban a rendszer befolyásolása szempontjából sokkal jobban kézbentartható a 36.A. ábrán bemutatott elrendezés.

4.2.1.3.3. AZ ULTRAHANG BIOTECHNOLÓGIAI FELHASZNÁLÁSAIRA VONATKOZÓ KÖVETKEZTETÉSEK

Látható, hogy az ultrahang a fermentációs iparokban alkalmas mind az up-stream, mind a down-stream műveletek támogatására.

Az up-stream kategóriában nagyon lényeges a szaporodó és a fermentációs képesség fokozó, vagyis a stimuláló hatás, melynek kapcsán a szakirodalmak az eltérő vizsgálati körülményekhez mérten mindenütt 10%, vagy e feletti stimulációs szintet (műveleti időben, sejttömeg kihozatalban, szubsztrát konverzióban, termékképzésben, stb.) mértek a kontroll mintákhoz képest, ami anyagilag óriási előnyt jelent az ultrahang alkalmazóinak, a konvencionális technikai alkalmazásokhoz képest.

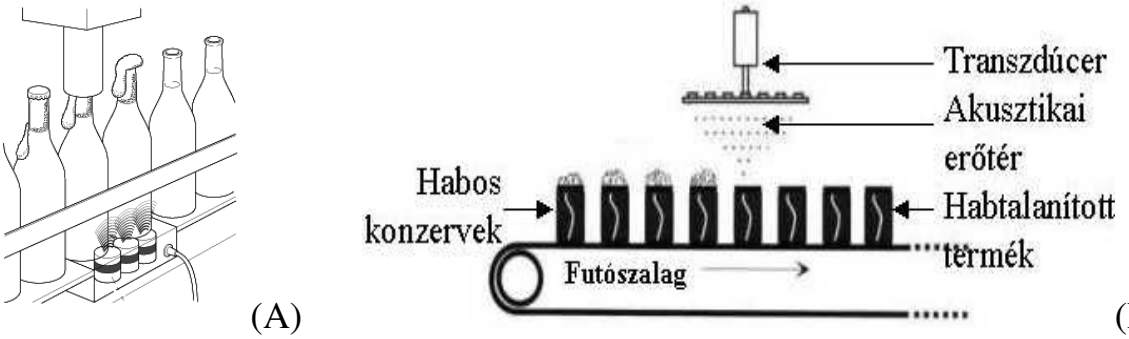
A down-stream műveletekben fontos szerepe van az ultrahangnak a sejtek és a fermentlé szétválasztásában (akár a fenti 34. ábra szerinti módokon), illetve a sejt belső anyagcseretermékeinek kinyerésében, a sejtroncsolásban, vagy dezinficiálásban.

4.2.1.4. AZ ULTRAHANG NÉHÁNY KONKRÉT ÉLELMISZERIPARI ALKALMAZÁSA

Az ultrahang alkalmazható a konzervek zárás előtti habzásának megszüntetésére, hasonlóan a fermentornál alkalmazott 33. ábra szerinti módozathoz, vagy éppen ellenkező irányból alkalmazva más termékeknél a zárás előtti palackozás előtt álló termékek habosításra (37. ábra).

Az élelmiszeriparban egyre elterjedtebb a cipők, csizmák és textíliák mosására, tisztítására, fertőtlenítésére való alkalmazása az ultrahangnak. Alkalmazható továbbá a fagyott húsok felengedésére, tészták kelesztésének gyorsítására, helységfertőtlenítésre, ipari ultrahang mosógépnek, rizs és más szemes termények mosására, valamint halhús fehérítésre. Újabban egyre gyakrabban alkalmazzák savanyúságban a tejsavbaktériumok (*lactobacillus*)

élettevékenységének serkentésére, egyes porított élelmiszerek nagyhatékonyságú szárítására, a hűtőgépek hűtési teljesítményének növelésére, és egyéb élelmiszeripari műveletekre.



37. Ábra: Az ultrahang konzervipari alkalmazásai (A, habosítás, B, habtörés)

Az ultrahangos szárítási eljárás, az értékes komponenseket tartalmazó, általában porított, vagyis hozzávetőleg 1mm alatti szemcsékből álló halmazok dehidratációjának, illetve oldószer mentesítésének céljára, a 33.B. és a 37.B. ábrán feltüntetett ultrahangrendszert alkalmazza. Az eljárás mind az élelmiszer,- mind a gyógyszer,- mind a vegyipari felhasználásokra vonatkozóan komoly lehetőségeket tartogat.

4.2.1.5. AZ ULTRAHANG SEJTBIOLÓGIAI HATÁSAIRA VONATKOZÓ VIZSGÁLATOK

Mindössze élményszerűen villantanám fel a 38. és a 39. ábrát, mint az aktív ultrahang egyik leggyakrabban használt, mondhatnánk, hogy legnépszerűbb alkalmazásának, a sejtroncsolásnak bemutatására. Korábban érintőlegesen a munkánkkal kapcsolatban utaltam erre az alkalmazásra, sőt a 24-26. ábrán feltüntettem néhány képet az általunk tervezett és gyártott berendezésekről, valamint a kezelések eredményeiről.

Ezen a helyen a konkrét eredmények azon részét ismertetem, melyek az ultrahang globális, mindenki által hozzáférhető felhasználási lehetőségéhez, az akusztikai sejtroncsolás fizikai alapjainak megértéséhez és élményszerűbbé tételéhez szükségesek, ahhoz, hogy megértsük, miért van nagy jelentősége a kezelés végeredményében a különböző befolyásoló fizikai tényezőknek.

Saccharomyces cerevisiae pékélesztő szuszpenziót különböző kibocsátott teljesítményekkel kezeltünk 1,117MHz frekvencián és mértük a tizedelési időt (D). A tizedelési időintervallum (D) az a terminus, amely mellett a szuszpenzióban lévő sejtek élő sejtszáma a kiindulási tizedére csökken. Mivel ezt általában a fizikai kezelések esetében exponenciálisra vesszük, ezért ez az időben egy állandó érték (log-normál diagrammban egyenes), vagyis 10^7/ml-ről 10^6/ml-re ugyanannyi idő alatt csökken a sejtszám, mint 10^1/ml-ről 10^0-ra.

A mért élő sejtszámokból a tizedelési idő (D) meghatározása a következő [11-12]. képletek alapján történt:

$$\mathbf{k = ((2{,}303 / (t-t_0)) * \lg (N_0 / N_t)} \qquad \mathbf{[11]}$$

$$\mathbf{D = 2{,}303 / k} \qquad \mathbf{[12]}$$

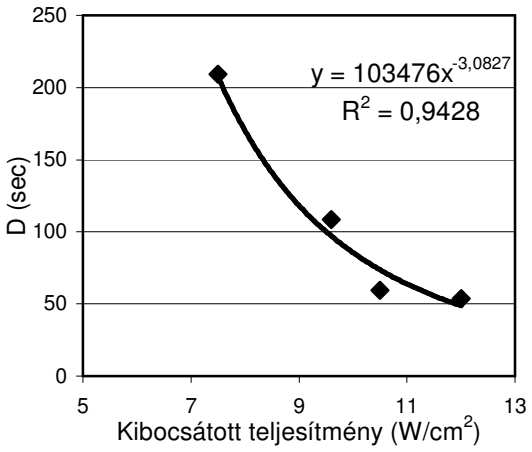
Az egyenletben az (N) a túlélő sejtszám, melynek változása (t) idő alatt arányos a mindenkori sejtszámmal, és ahol a (k) arányossági tényező a pusztulási sebességi együttható, vagyis a fajlagos pusztulási sebesség, (N_0) a kezdeti sejtszám (t_0) időpillanatban és (N_t) a túlélő sejtszám (t) időpillanatban.

A mikrobapopulációk pusztulásának alapegyenlete ([13]. képlet):

$$\mathbf{N_t = N_0 * e^{-k(t-t_0)}} \qquad \mathbf{[13]}$$

A [13]. egyenlet azonos az exponenciális szaporodás egyenletével, csak az együttható negatív előjelű.

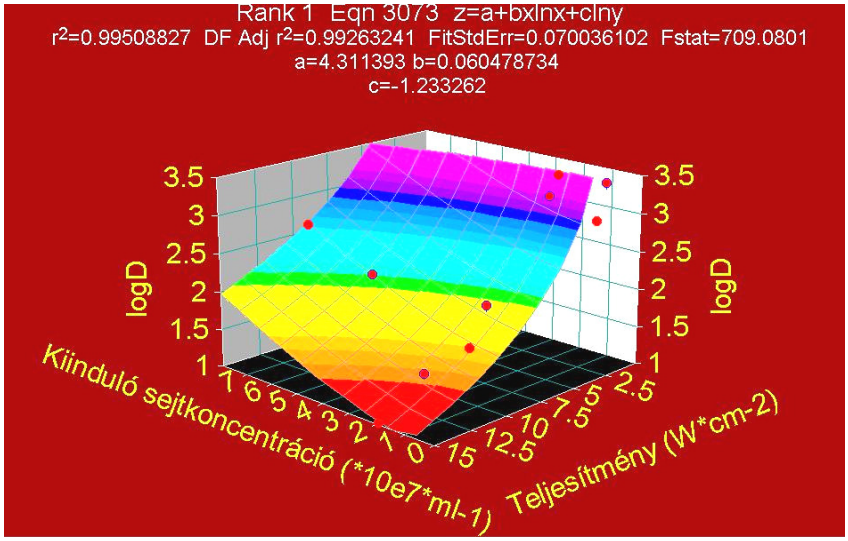
A 38. ábra a *Saccharomyces cerevisiae* pékélesztőgomba D értékeit mutatja különböző kibocsátott ultrahang teljesítmények mellett.



38. Ábra: „D" értékek alakulása a kibocsátott ultrahang teljesítmények függvényében $2*10^7$/ml koncentráció mellett (Forrás: Lőrincz, A., 2003)

A 38. ábrán látható, hogy a "D" vagyis a tizedelési idő érték a teljesítmény növekedésével fordított arányban változik. Azaz minél nagyobb teljesítményeket alkalmaztunk, annál kisebb D értékeket kaptunk.

Amennyiben egy másik faktort, a sejtkoncentrációt is figyelembe vettünk ennél a vizsgálatnál a tranziens kavitáció (2.3.2.1. fejezet) akusztikai jelensége mellett, úgy a 39. ábrát kaptuk.

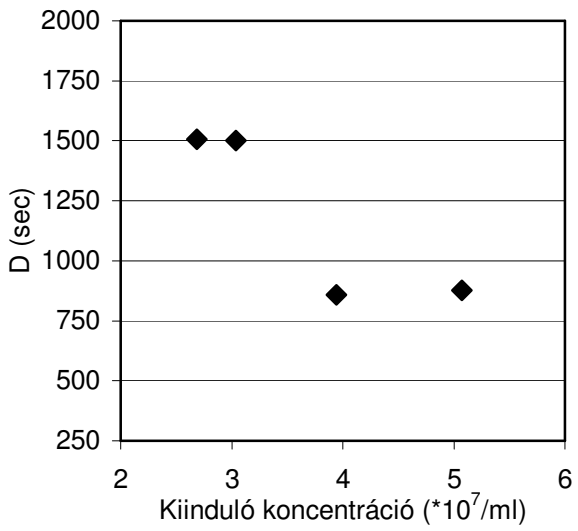


39. Ábra: A *Saccharomyces cerevisiae* rezisztenciasíkja különböző alkalmazott ultrahang teljesítmények és sejtkoncentrációk mellett (Forrás: Lőrincz, A., 2003)

Jól megfigyelhető, hogy a sejtkoncentrációk és a D értékek egyenes arányban viszonyulnak egymáshoz az akusztikai kavitáció jelensége mellett. Tehát a D értékek az alkalmazott ultrahang teljesítménnyel fordított, míg a sejtkoncentrációval egyenes arányban állnak. Azt is megfigyelhetjük, ha a 35. és a 38. ábrát gondosan szemügyre vesszük, hogy mindkét kezelt mikroorganizmus faj esetében hatással volt a koncentráció, illetve az alkalmazott teljesítmény a sejtek túlélésére. Például figyeljük meg a 6W/cm^2 teljesítmény melletti kezelés hatását mindkét mikroorganizmus fajra. Az összehasonlítás a közel azonos kiinduló csíraszámok, illetve a tranziens kavitáció jelensége miatt megtehető. Látható, hogy a *Pseudomonas aeruginosa* baktérium esetén serkentő, míg a *Saccharomyces cerevisiae* élesztőgombánál pedig gátló, roncsoló hatása van ennek a kezelési szintnek. A 2.6.6. fejezetben erre a hatásra természetesen találhatók biofizikai magyarázatok, azonban ebben az esetben, bár jelen tanulmány nem ennek bizonyítására irányul elsősorban, mégis könnyű belátni, hogy amennyiben mindkét sejttípus jelen van a hangtérben a besugárzás alatt, úgy azokra azok egymáshoz viszonyított sejtszámának és az alkalmazott ultrahang intenzitásnak a függvényében eltérő (serkentő és gátló) hatások

érvényesülhetnek. Ezek alapján pedig ezek a serkentő és gátló hatások célirányosan befolyásolhatóak, így kialakítható a fajok közötti szelektív ultrahangkezelés is. A fenti példát követve tehát 6W/cm^2 teljesítmény mellett kiirtható az élesztőgomba a baktérium mellől, vagyis az egyik faj a másik mellől, ami nagyon fontos megfigyelés.

Itt térek vissza még egyszer a koncentráció fontosságához, amely alapvető hatással van az ultrahangtérben kialakuló akusztikai jelenségekre. Abban az esetben, hogyha túl magas koncentrációt, vagy túl alacsony akusztikai nyomás amplitúdót (ultrahang intenzitást) alkalmazunk, úgy leállhat a kavitáció és akusztikai állóhullám alakul ki. Nézzük ez milyen drasztikus eredménnyel jár a sejtroncsolás mérvadó viszonyszámára, a D értékre (40. ábra).



40. Ábra: Állóhullám melletti tizedelési idők különböző sejtkoncentrációknál 9W/cm^2 mellett, 4 ismétlésből, *Saccharomyces cerevisiae* esetén (Forrás: Lőrincz, A., 2003)

Látható a 40. ábrán, hogy 9W/cm^2 teljesítmény mellett az élesztőgomba D értékei fordított arányban változtak az alkalmazott kiinduló sejtkoncentrációkkal az állóhullám akusztikai jelensége mellett (39. ábrán az is látható, hogy a

tranziens kavitáció mellett, a kiinduló koncentrációkkal egyenes arányban változnak a D értékek, tehát az állóhullámmal ellentétesen, ami ismét egy szelekciós tényező). Számunkra most azonban elsősorban az a fontos, hogy az addigi kavitáció melletti 100 másodperc körüli D értékek (38. ábra) 1500 másodperc körülire növekedtek $2*10^7$/ml koncentráció környékén (40. ábra), az állóhullám kialakulásának következtében, ami egyszerűen gondosabb odafigyeléssel, kísérletek, labor, vagy ipari munka szakszerű tervezéssel kiküszöbölhető lenne, amennyiben sejtroncsolást folytatunk. Tehát sejtroncsolásnál a tranziens kavitáció hallható hanghatásának megfigyelésére kell törekednünk (21. ábra)!

Ha megfordítom a kapott eredmények értelmezését, akkor elmondható, hogy a fermentáció során a hangtérben lévő sejtek leválasztása, szeparációja állóhullám segítségével különösen annál is inkább ajánlott (4.2.1.2. fejezet), az előzőekben vázolt technológiai előnyökön kívül, mert állóhullám során nem jelentős (0,5% alatti) a sejtek vitalitás csökkenése. Ennek oka a ritkán előforduló sejtek általi akusztikai erővonal átlépések, illetve a hangtérben eltöltött rövid tartózkodási idő.