



SEPARATION IN HIGH SPEED INTERNAL FLOWS

Rudolf DVOŘÁK*

***Summary:** There are several characteristic features that distinguish separation in internal flows from that in external flows. The effect of side walls as well as of secondary flows due to wall curvature always make the phenomenon three-dimensional. Aerodynamic choking at higher velocities affects flow separation by closing the separation bubble, or by suppressing it entirely. The outflow conditions (namely the backpressure) can significantly change the conditions for flow separation (local versus global separation). Development of the separated flow and its boundary depends on the channel geometry, so that any analytical solution always has to solve simultaneously the viscous and inviscid parts of the flow field (strong interaction.). As an example, transonic separated flow in a highly curved closed channel has been analyzed on the basis of surface streamline visualization, as well as on optical and pressure measurements. The existence of two kinds of separatrices, the back flow, and the flow reattachment are discussed. The results may be useful in interpreting experiments in various channels and cascades.*

1. ÚVOD

Mluvíme-li o odtržení proudu ve vnitřní aerodynamice, měli bychom hned v úvodu uvést jak se liší od odtržení proudu v aerodynamice vnější, a proč je tedy nutné zabývat se jím zvlášť.

Održení ve vnitřní aerodynamice vzniká v ohraničených prostorech, kde se na jeho vzniku a vývoji podílí značnou měrou *přítomnost ohraničujících stěn*. Právě v důsledku tohoto ohraničení **je odtržení prakticky vždy trojrozměrnou záležitostí**. Jelikož vzniká vždy v zakřivených kanálech (nebo alespoň na zakřivených stěnách), vyskytuje se prakticky vždy *ve spojení se sekundárním prouděním*. Při vyšších rychlostech (resp. při proudění stlačitelné tekutiny) se uplatní **vznik a vliv kritického průřezu** v důsledku změny efektivního tvaru kanálu i vlivem samotného odtržení.

Trochu jiný význam než v aerodynamice vnější mají zde pojmy **lokálního** a **globálního odtržení** (zejména při vzniku nestacionarit a při výraznějším vlivu protitlaku). Lokální odtržení vyžaduje nejen vytvoření podmínek pro vznik odtržení, ale i podmínek pro zpětné přimknutí proudu. Na rozdíl od vnější aerodynamiky jsou tyto podmínky v převážné většině případů výrazně závislé na geometrii kanálu. Toto odtržení může přejít v globální odtržení, pokud podmínky pro zpětné přimknutí uvnitř kanálu nejsou z jakéhokoli důvodu splněny. Globální odtržení nemusí ale být vůbec vyvoláno lokálními podmínkami pro odtržení, ale může být způsobeno celkovým uspořádáním – např.

* ing. Rudolf Dvořák, DrSc., Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8,
tel. +420 2 6605 3132, dvorak@it.cas.cz

protitlakem, který posune zpětné přimknutí proudu proti proudu až k samotnému odtržení, popř. posune i bod odtržení do míst, kde by jinak nevzniklo¹.

Održení může být vyvoláno *tlakovými silami* (např. odtržení na zakřivené ploše, odtržení v důsledku interakce rázové vlny a mezní vrstvy), může ale také být vyvoláno *náhlou změnou tvaru tělesa* (např. odtržení za schodem), popř. může vzniknout za tupým tělesem vloženým do uzavřeného kanálu (např. tělesa s tupou odtokovou hranou v aerodynamickém tunelu). Z hlediska vnitřní aerodynamiky nás budou zajímat především první dva případy.

Z fenomenologie trojrozměrného odtrženého proudění je zřejmé, že nelze očekávat jednoduché a jednoznačné kritérium odtržení, podobně jak je známe z dvourozměrného proudění. Ve vnější aerodynamice lze odvodit jistá lokální kritéria (viz např. Chapman, Yates, (1991)), která v trojrozměrném proudění klasifikují odtržení proudu u stěny. Jejich užití ve vnitřní aerodynamice je však daleko obtížnější, neboť se jedná o mnohem "silnější interakci" vazkého proudu u stěny a proudu mimo stěnu. Zejména při vyšších rychlostech se citlivost změn rychlosti na sebemenší změnu efektivního průřezu (např. právě v důsledku odtržení) velice výrazně uplatňuje. To znamená, že *vznik a vývoj odtržení ve vnitřní aerodynamice musíme prakticky vždy řešit simultánně s řešením proudění v celém kanále*. Z hlediska zavedených definic (viz např. Dvořák, Kozel (1996)) se jedná o tzv. **silnou interakci** vazkého a nevazkého proudění.

Významným počinem byla dnes již klasická práce Maskellova (1955), která - na rozdíl od dvourozměrných řešení - nahlíží na **trojrozměrné odtržení jako na samostatný jev a nesnaží se jej popisovat jen jako singulární chování mezní vrstvy**. Z hlediska převážně jen matematického se zabýval odtržením, bohužel jen dvourozměrného proudu, v řadě svých prací F.T. Smith (viz např. Smith (1986)), který však rovněž zdůrazňuje význam *hranice odtrženého proudu jako samostatného proudového útvaru*.

Většina prací týkajících se trojrozměrného proudění se zaměřila na tzv. **topologii proudnic v oblasti odtržení**, speciálně na **topologii povrchových proudnic**, vycházející z klasické kvalitativní teorie diferenciálních rovnic (Poincaré (1928), viz např. Lighthill (1963), Tobak, Peake (1982), Chong, Perry, Cantwell (1990); Chapman, Yates (1991), a j.). Motivací zde byla především vnější aerodynamika štíhlých a rotačně souměrných těles, méně pozornosti již bylo věnováno aerodynamice trojrozměrných objektů umístěných na rovinném povrchu (např. Hunt aj. (1978)). Ojedinelé práce z oblasti vnitřní aerodynamiky se týkaly hlavně odtržení proudu v uzavřených kanálech v důsledku interakce rázové vlny a mezní vrstvy (Dvořák (1993), Dallmann, Doerffer (1989), Benay, Pot (1986), Délerly (1992), Dvořák (1994)).

I přes bezesporný přínos těchto topologických úvah, jejich interpretace - zejména při porovnání s experimentálními zkušenostmi - není jednoduchá a jednoznačná. Upozorňuje na to např. Délerly (1992), který odmítá představu otevřeného odtržení (jedná se o vnější aerodynamiku!) a zavádí jako další pojem **efektivní odtržení**, k němuž dochází v místech, kde povrchové proudnice konvergují k hranici odtržení. Tato interpretace je z fyzikálního hlediska nejčistší a také nejpravděpodobnější, zejména zajímáme-li se o oblast odtrženého proudu ve větší vzdálenosti od stěny.

Dallmann a Gebing (1994) se pokusili extrapolovat postup, kterým objasňovali jevy na stěně i do prostoru. Neodpovídají ale jednoznačně na vliv geometrie kanálu na celý vývoj mimo stěnu. Jejich přínos ale spočívá v tom, že na problém odtržení v kanále se dívají jako na *dynamický systém*, který je lokálně ekvivalentní s pohybovými rovnicemi nestlačitelného proudění.

1 To, co zde označujeme jako lokální a globální odtržení má ve vnější aerodynamice jistou paralelu v pojmech **uzavřeného** a **otevřeného odtržení**, zavedených Wangem (1975).

Uvedené práce týkající se trojrozměrného odtržení v kanálech (s výjimkou posledně citované) jsou převážně pracemi experimentálními, snažícími se získat potřebný výchozí materiál pro hlubší fyzikální analýzu tohoto jevu. Kromě značné složitosti a rozmanitosti jevu samotného komplikuje tuto analýzu podvědomá zkušenost z řešení odtržení ve dvourozměrném případě, projevující se ve zjevné snaze o extrapolaci teorie trojrozměrné mezní vrstvy až k odtržení. V našich úvahách předpokládáme, že *odtržení v kanále je sice ovlivněno mezní vrstvou nabíhajícího proudu, ale ne do té míry, že by jen tato vrstva rozhodovala o jeho charakteru a vývoji.*

Odtržení na stěnách v uzavřených a zakřivených kanálech se vyskytuje prakticky **vždy ve spojení se sekundárním prouděním**. Porovnáme-li proto odtržení na zakřivené ploše, která představuje vnitřní stěnu zakřiveného kanálu, s odtržením na stejné zakřivené ploše (profilu) v neohraničené oblasti, musí být mezi nimi rozdíl. Sekundární proudění podporuje odtržení v meridionální rovině kanálu. Současně ale přítomnost protistěny "tlačí" hranici odtrženého proudu zpět k povrchu, na němž odtržení vzniklo.

Ve vnější aerodynamice odcházejí proudnice charakterizující odtržený proud od tělesa (vzdalují se tělesu při odtržení, čímž nevylučujeme případ, kdy se proud zpětně přimkne k profilu, tj. kdy vzniká *uzavřená separační bublina*).

Na rozdíl od vnější aerodynamiky musíme počítat s tím, že ve vnitřní aerodynamice (zejména v tzv. relativně úzkých kanálech, viz např. Dvořák (2000)) se bude proud současně odtrhávat i na bočních stěnách. Odcházejí-li proudnice v místě odtržení od obou stěn do okolního proudu, musejí se nutně proudnice ze dvou sousedních (ev. i protilehlých) stěn uvnitř kanálu nějakým způsobem navzájem přiblížit, popř. setkat, zaplést se, a pod. Jedná-li se např. o vírové trubice odcházející z oblasti odtržení, pak v jádře proudu (resp. ve střední části kanálu) dojde k jejich vzájemné interakci, např. k zaplétení, a pod., které v konečné podobě vyústí v nějakou **novou vírovou disipační strukturu** (Dvořák (1996)).

Uvážíme-li nyní všechny výše uvedené okolnosti a rozdílné vlastnosti odtrženého proudění ve vnější a vnitřní aerodynamice, zejména přijmeme-li předpoklad, že se ve vnitřní aerodynamice jedná vždy o silnou interakci oblasti odtrženého proudu a okolního proudu, dospějeme nutně k otázce, za jakých podmínek se nastaví "rovnovážný stav", v němž konfigurace kanálu a výchozí parametry proudu umožní vznik právě sledovaného odtržení. Je to, jinak řečeno, *problém hledání ustálené hranice mezi oblastí odtrženého a neodtrženého proudu v kanále*, a z něho bezprostředně vyplývající otázka, *zda budou rozhodovat o vzniku odtržení lokální, či globální kriteria.*

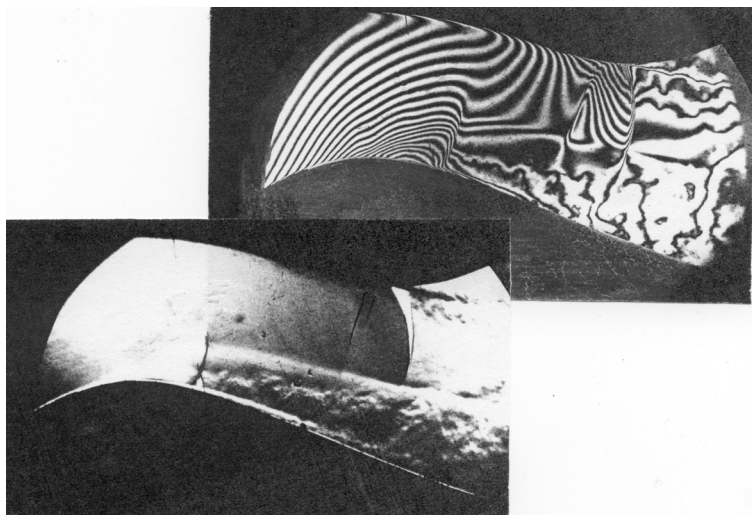
Pokud zde hodnotíme skutečný stav znalostí a dosavadní výsledky, pak je nutno zdůraznit, že zde stojí vedle sebe empirické závěry dosavadního experimentálního výzkumu (zahrnující většinu zatím citovaných prací) a výsledky numerické simulace různých případů interakce vírových vláken (struktur). To, co dnes víme o vírových strukturách se opírá především o tyto výsledky počítačové simulace! Jinak řečeno, *dodnes neexistuje jediná práce založená na analytickém řešení problému, stejně tak však dosud neexistuje jediný uspokojivý matematický model problému trojrozměrného odtržení, navíc ve vnitřní aerodynamice.*

V našich experimentech (Dvořák, 1993, 1994) bylo ukázáno jak výrazně závisí rozsah a zřejmě i struktura oblasti odtržení na šířce kanálu. V zásadě bylo možno konstatovat, že rozsah odtržené oblasti (především ve směru proudu) rostl se zmenšující se šířkou kanálu. V nejužších kanálech nebylo vůbec dosaženo zpětného přimknutí proudu. Současně ale nebylo zaznamenáno ani nějaké výraznější zpětné proudění. Měnil se tedy se šířkou kanálu nejen rozsah, ale i topologie povrchových proudnic. Lze se proto zcela oprávněně domnívat, že *dosud známé publikované výsledky jsou zatíženy závislostí na šířce kanálu a lze jen těžko očekávat, že by byly reprodukovatelné při jiných šířkách.* K tomuto poznatku se vrací i Czerwinska a Doerffer (1999), přestože se nezdá, že by výsledek numerického řešení plně podpořil některé starší práce Dallmanna a Doerffera.

V této práci uvedeme případ odtržení v silně zakřiveném kanále při vysokých podzvukových rychlostech, vycházející z měření, prováděných v Ústavu termomechaniky AV ČR.

2. POPIS EXPERIMENTU A ROZBOR VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno v malém vysokorychlostním tunelu v aerodynamické laboratoři ÚT AVČR v Novém Kníně. Měřicí prostor měl šířku 80mm a jeho spodní silně zakřivená stěna měla tvar sinusovky, horní stěna vytvářela mírně zužující se kanál s nejužším průřezem za vrcholem spodní stěny a byla zakončena stavitelným rozevřením, které umožňovalo v jistém malém rozmezí regulovat i protitlak.



Prováděna byla pneumatická měření (rozložení tlaku, sondáže rychlostních profilů po celém průřezu kanálu), optická měření (zviditelnění šliřovou metodou a interferometrická měření) a zviditelnění povrchových proudnic nátěry. Situace je patrná z **obr.1**, odpovídající proudění s místní nadzvukovou oblastí, zakončenou uzavírací rázovou vlnou, a z **obr.2**, z něhož je patrné, jak vypadalo zviditelnění povrchových proudnic.

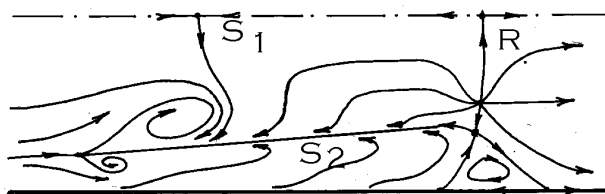
Obr.1

Během celého měření bylo sledováno, jak se povrchové proudnice postupně vytvářejí a jak probíhají (toto měření bylo vždy vícekrát opakováno, aby bylo možno soustavu zviditelňovaných proudnic udělat dostatečně řídkou, popř. ji vždy doplnit v místech, kde byly určité pochybnosti o možné interpretaci jejich průběhu). Po zastavení tunelu byl celý obrazec přesně překreslen, a na základě uvedeného sledování byl do něj zaznamenán směr proudění.



Obr.2

To umožnilo poměrně přesnou interpretaci topologické struktury povrchových proudnic. Na **obr.3** je uveden příklad takové rekonstrukce, odpovídající situaci dle **obr.1**. Nicméně, často lze najít i variantní interpretace, které mají dostatečné fyzikální oprávnění.



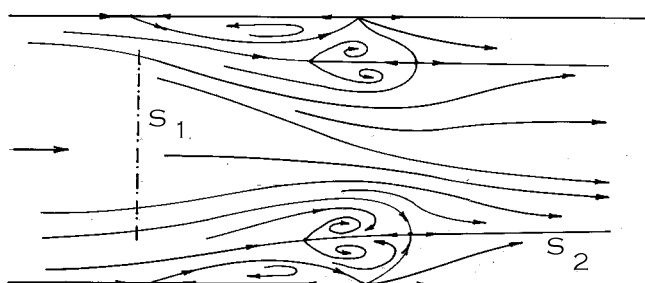
Obr.3

Na **obr.3** je zaznamenán případ lokálního odtržení za uzavírací rázovou vlnou, která vyvolá odtržení na hranici S_1 , protínající osu kanálu v bodě S . Kromě této hranice je zde patrná další hranice (separatrix) označená v

obrázku jako S_2 , která je téměř rovnoběžná s boční stěnou. Začíná přibližně na vrcholu sinusovky, tj. někde kolem začátku místní supersonické oblasti, a končí před uzávěrem oblasti lokálního odtržení, tj.

na čáře **B**. Při všech měřeních, tj. při různých hodnotách Machových čísel, nebyla pozorována výraznější kvalitativní změna topologie povrchových proudnic. Docházelo k posunu rázové vlny (např. změnou protitlaku), což změnilo celou strukturu pouze kvantitativně. Hranice S_2 se přitom prakticky nezměnila, z čehož lze usoudit, že její poloha a existence je dána pouze geometrií kanálu a v tomto případě tedy i sekundárním prouděním. Varianta dle obr.4 se od předchozí liší pouze chováním povrchových proudnic v místě průsečíku hranic S_1 a S_2 . Mění se proudnice v oblasti A, které zde nezabíhají až do víru B, ale vrací se u hranice S_2 zpět a vytváří tak vír A. Dvojice vírů A a B žene tekutinu k hranici S_2 , podél níž pak tekutina směřuje kolmo do proudu, až je zastavena vnějšími vlivy (tj. vlivy mimo mezní vrstvu), např. sekundárním prouděním v jádře kanálu. Obě alternativy jsou reálné a v podstatě vedou k témuž výsledku: za rázovou vlnou vzniká lokální odtržení, které je do jisté míry podporováno sekundárním prouděním. Rozsah tohoto odtržení je omezen z boku hranicí S_2 . Vír B se dostává podél této hranice do proudu, kde se stáčí po proudu a splývá se sekundárním prouděním. Hranice S_2 v sobě do jisté míry soustřeďuje hlavní odlišnosti trojrozměrného odtržení od odtržení dvourozměrného. Přestože je na schematu označována hranice S_1 jako hranice odtržení pod rázovou vlnou, vlastní rázová vlna leží před touto hranicí, na úrovni víru B, jehož rozsah je dán intenzitou rázové vlny, resp. stlačením v této vlně, které způsobuje výraznou kontrakci proudu. Jelikož to, co vidíme na snímcích (např. na obr.1), se odehrává mezi hranicemi S_2 podél obou bočních stěn, a je ovlivněno všemi popisovanými vírovými strukturami, stejně tak jako v uzávěru lokálního odtržení i obtékáním horní stěny, lze jen těžko očekávat, že by bylo možno odtržení charakterizovat stejnými kritérii, jako v dvourozměrném případě, nebo ve vnější aerodynamice.

Za pozornost stojí i patrné výrazné ohrazení disipativní oblasti nad silně zakřivenou stěnou, (na obr.1 světlý pruh, probíhající ve směru proudu téměř polovinou výšky kanálu). Porovnáním snímků pořízených při postupně zvyšujících se rychlostech, popř. snímků při jiné výšce kanálu, lze usoudit, že se jedná o hranici separační bubliny, tj. o hranici oblasti, v níž se odehrává vše, co bylo popisováno na předchozích obrázcích.



Délka kanálu za vrcholem zakřivené stěny je poměrně malá a dalo se předpokládat, že právě tato skutečnost by mohla ovlivnit strukturu oblasti odtržení. Měřicí prostor byl proto upraven ve své horní protistěně tak, že se zvětšil její radius. Tím se současně prodloužil celý silně zakřivený kanál, což ovlivnilo počátek i rozsah

Obr.4

odtržení. Docházelo k němu jak na silně zakřiveném povrchu, tak i na zakřivené protistěně u výstupu z kanálu, až při nižším protitlaku, tj. až při větších rychlostech. Na rozdíl od předchozího případu je hranice S_1 méně výrazná a hranice odtržení S_2 jsou posunuty po proudu, stejně tak jako hranice zpětného přimknutí proudu (viz např. **obr.4**).

3. ZÁVĚR

Odtržení proudu v uzavřených a zakřivených kanálech má čistě třírozměrný charakter a nelze na ně přenášet běžná kritéria z dvourozměrného proudění. Rozsah i struktura oblastí lokálního odtržení závisí i na příčném rozměru (šířce) kanálu.

Typickými pro toto odtržení jsou hranice S_2 , probíhající rovnoběžně s bočními stěnami, podél nichž tekutina stoupá od stěny a vrací se do oblasti lokálního odtržení, dávající tak zpětnému proudění prostorový charakter. Jsou též téměř nezávislé na rychlosti proudu.

Práce vznikla při řešení projektu "Odtřžené proudění ve vnitřní aerodynamice", podporovaném Grantovou agenturou AV ČR pod reg. č. A 2076901

4. LITERATURA

- Benay R., Pot T. (1986): Experimental study of shock wave/boundary layer interaction in a three-dimensional channel flow, In: *Turbulent shear layer/shock wave interaction*, IUTAM Symposium, Ed. J.Délery, Palaiseau, 1985, pp.273-281, Springer Verlag
- Chapman G.T., Yates L.A. (1991): Topology of flow separation on three-dimensional bodies *Appl.Mech.Review*, Vol.44, No 7, July 1991, pp.329-345
- Chong M.S., Perry A.E., Cantwell B. (1990): A general classification of three-dimensional flow fields, *Physics of Fluids A*, Vol.2, No 5, pp.765-777
- Czerwinska J., Doerffer P. (1999): An effect of the curved passage depth on the shock-induced separation flow structure, In: *3rd European Conference on Turbomachinery*, Vol.A, IME Conference Transactions 1999-1A, London, pp.211-220
- Dallmann U. (1988): Three-dimensional Vortex Structures and Vorticity Topology In: *Fluid Dynamics Research*, 3, North-Holland, pp.183-189
- Dallmann U., Doerffer P. (1989): Three-dimensional Flow Separation caused by Normal Shock Wave- Turbulent Boundary Layer Interaction, In: *IUTAM Symposium Transsonicum III*, J.Zierep, H.Oertel (Eds.), Göttingen, pp.429-438, Springer Verlag, Berlin, 1989
- Dallmann U., Gebing H. (1994): Flow attachment at flow separation lines. On uniqueness problems between wall-flows and off-wall flow fields In: *Acta Mechanica* (1994), Suppl.4, (Zierep Festschrift), pp.47-56
- Délery J. (1992): Physics of vortical flows *AIAA Journal*, Vol.29, No 5, 1992, pp.856-876
- Dvořák R. (1993): Three-dimensional effects in transonic channel flows In: *Proceedings 2 ISAIF*, Vol.1, Praha, 1993, pp.205-210
- Dvořák R. (1994): Flow separation in closed curved channels *IT News*, Vol.3, No 1
- Dvořák R. (1996): Vortices and vortical structures in internal aerodynamics *Journal of Thermal Sciences*, Vol.6, No 2, pp.86-89
- Dvořák R. (2000): Supersonic/subsonic transition in relatively narrow channels *Journal of Thermal Sciences*, Vol.9, No 4, pp.292, 311-315
- Dvořák R., Kozel K. (1996): *Matematické modelování v aerodynamice* Eds ČVUT, Praha, 1996
- Hornung H., Perry A.E. (1984): Some aspects of three-dimensional separation, Pt.I: Stream surface bifurcations *Z.Flugwiss.Weltraumforschung*, Vol.8, Hf.2, pp.77-87
- Hunt J.C.R., Abell C.J., Peterka J.A., Woo H. (1978): Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization *J.Fluid Mech.*, Vol.86, 1978, pp.179-200
- Lighthill M.J. (1963): Introduction. Boundary layer theory In: *Laminar Boundary Layers*, Ed.L.Rosenhead, Oxford, Clarendon Press, pp.46 - 109
- Maskell E.C. (1955): Flow separation in three dimensions *Royal Aircraft Establishment*, Farnborough, Rep. No Aero 2565
- Poincaré H. (1928): Les points singuliers des équations différentielles *Oeuvres de Henri Poincaré*, tome I., Paris, Gauthier-Villars
- Smith F.T. (1986): Separating Flow: Small-scale, Large-scale and Nonlinear Unsteady Effects In: *Boundary Layer Separation*, IUTAM Symposium, London, Springer, 1987, pp.331-345
- Tobak M., Peake D.J. (1982): Topology of three-dimensional separated flows In: *Ann.Rev.Fluid Mech.*, Vol.14, pp.61-85
- Wang K.C. (1975): Boundary layer over a blunt body at low incidence with circumferential reversed flow *J.Fluid Mech.*, Vol.72, pt.1, pp.49-65