

АЕРОДИНАМИКА МАГЛЕВ ВОЗА У ВАКУУМУ**AERODYNAMICS OF MAGLEV TRAIN IN VACUUM**

Станислав Алмаши, Факултет техничких наука, Нови Сад

ОБЛАСТ – САОБРАЋАЈ

Кратак садржај: *Тема овог рада обухвата перспективу развоја система возње МАГЛЕВ возова у вакууму. Резултати постигнути у овом напредном систему су охрабрили истраживања могућности примене возње конвенционалних железничких система у вакууму тубусне трасе, доминантно метроа.*

Кључне речи: *МАГЛЕВ, аеродинамика, вакуум*

Abstract – *The topic of this review paper includes the perspective of the development of the MAGLEV train system in vacuum. The results achieved in this advanced system encouraged research into the application of vacuum rail system in conventional tube rail system, predominantly metro.*

Keywords: *MAGLEV, aerodynamics, vacuum*

1. УВОД

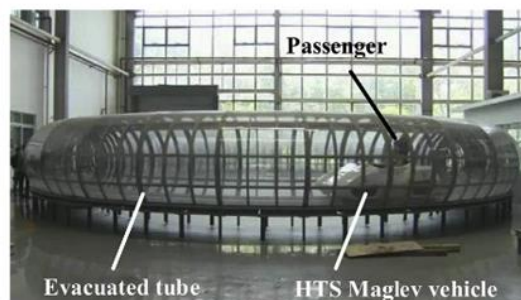
Са порастом брзине возова, отпор ваздуха у функцији квадрата брзине је постао доминантан. Аеродинамички облици чеоних, бочних и фронталних површина железничких средстава су доведени до савршенстава. Конструкциони капацитет је у потпуности исцрпљен, а отпори ваздуха су и даље остали услов даљег повећања брзина насупрот великим економским губицима због прекомерног отпора кретања. Довелно је навести да је код железничких возила повећање брзина са 300 км/х на 360 км/х захтева двоструко повећање инсталисане снаге. Иницијално претенциозна идеја формирања трасе у вакууму је после неких разматрања доживела велику пропагацију због могућности енормног смањења отпора од ваздуха, економских уштеда у смањењу уложене енергије и смањења трошкова инсталације погонских агрегата. Иницијалне процене су да се возњом у вакууму може постићи брзина возова већа од 1000 км/с.

Највеће бриге које се односе на воз у вакумираној цеви довело је до повећаног интересовања истраживача у области аеродинамике. Проучавају се везе између отпора ваздуха и спољашњег притиска, однос блокирања и брзина кретања (Kim et al., 2011; Liu et al., 2013; Jia et al., 2018). Ове студије пружају добру базу за почетни дизајн аеродинамичних параметара битних за возове у цеви. Упркос малом отпору ваздуха у цеви, још увек је неопходно контролисати раздвајање протока у близини површине воза или постићи вишециљну оптимизацију дизајнирањем облика.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Гордан Стојић, ред. проф.

Међутим, ове студије не објашњавају феномен ударних таласа које производи воз. Добро је познато да неки феномени удара се појављују неминовно у цеви док се реализује брзина на граници звука и надзвучне брзине. Појава удара у цеви је проузрокована угушењем протоком које може да се објасни Kantrowitz-ева теорија ограничења (Kantrowitz and Donaldson, 1945). Ударни таласи су толико често и водећа појава у суперсоничном протоку која захтева више пажње у процесу реализације суперсоничног кретања. Самим тим јавља се потреба за проучавањем видљивих, јасних аеродинамичних карактеристика супербрзог ЕТМТ-а као што је на пример компликована таласна структура.



Слика 1. Маглев тест систем

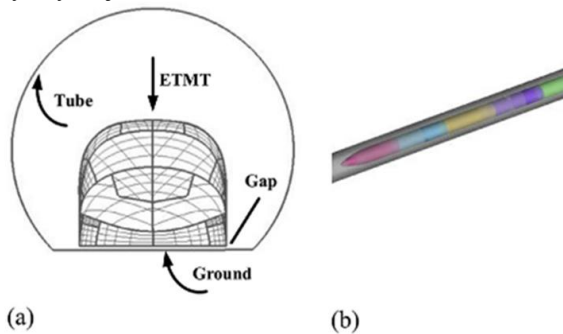
2. ХИПОТЕЗА КОНТИНУИТЕТА

Минимална количина ваздуха у цеви зависи од капацитета вакуумског екстрактора ваздуха. Упркос чињеници да што је нижи ЕТМТ отпор значи и мању количину ваздуха у цеви, и поставља се питање је да ли ће ефекат разређености да се деси пошто спољашњи притисак може да опадне до одређеног нивоа, што је примарно разматрање. Разређени проток гаса може да буде подељен у три домена: домен клизног тока, домен прелазног тока, домен слободно молекуларног тока одређен Кнудсеновим бројем, и он може бити изражен формулом:

$$K_n = \frac{k_b T}{\sqrt{2} \pi d^2 p l} \quad [1]$$

Где су K_n , k_b , T , d , p , l , Кнудсенов број, Болцманова константа, температура гаса, молекуларни дијаметар, притисак гаса, карактеристична дужина објекта који се изучава, респективно. За ваздух, вредност d -а се углавном креће између 0,1 nm до 1,0 nm у односу на T и p . Ако је K_n мањи од 0,01 ефекат разређења гаса није толико очигледан тако да проток може да сматра

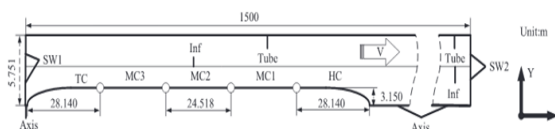
континуираним, што значи да је хипотеза континуитета прихватљива. За проток око воза, висина возила је често изабрана као карактеристична дужина. Како би разјаснили неке битне таласне појаве ЕТМТ-а када је под ниским притиском, 0,0001 atm и 300K су узети као спољасњи притисак и температура респективно. У овом раду висина возила је 3,15 m, максималан Кнудсенов број израчунат је 2.921×10^{-3} , мањи од 0,01, потврђујући да хипотеза континуитета може да буде усвојена.



Слика 2. Процес редуковања модела (а) попречни пресек стварног 3-D модела (б) редуковани аксиметрични 3-D модел

3. РЕДУКОВАНО МОДЕЛИРАЊЕ

Овде је представљен 2-D аксиметричан модел. Садржи лонгитудалне типичне геометријске криве, игноришући узак простор између пода возила и површине по којој воз иде. Модел садржи неколико добрих нумеричких апликација у аеродинамичним карактеристикама када је воз у цеви (Kim et al., 2011), оптимизацију облика Hyperloop (Orgenoord et al., 2018) и генерисање микро притска таласа при пролажењу кроз тунел што се слазе са експерименталним резултатима (Zhang et al., 2018). Због предности које пружа мала количина генерисане мреже и ниских трошкова прорачунавања, поједностављен модел може бити коришћен за прелиминарно истраживање појаве таласа коју производи ЕТМТ. Слика 3 показује цео процес редуковања модела. Важно је напоменути да је ЕТМТ модел поједностављен у глатку површину без икаквих ситних и компликованих структура као што је уређај преноса (суспензије). Коначно, редуковани 2-D модел укључује једна главна кола воза (НС), три средња вагона (МС) један вагон на крају воза (ТС), приказано на слици 3.



Слика 3. Шематски дијаграм 2-D аксиметричног рачунског домена

Треба имати у виду да није у правцу Y осе, сто је јасно приказано прорачунским доменом. НС И ТС имају исту дужину 28,140 m, дужина једног МС је 24,518 m. Висина сваког вагона је 3,15 m. Због потребе генерисања мреже, почетна позиција носа ТС-а је лоцирана 0,05 m даље од SW1 границе, не тачно на њој. Почетак правоугаоног координатног система је

код врха носа НС-а. Како би се осиграо потпуни развој поље протока око ЕТМТ и спречили нормални ударни таласи (NSW) да испред ЕТМТ ударе у предњи зид, дужина цеви је моделирана и износи 1500 m.

Осим тога, ако би у будућности ЕТМТ радио на соничне или суперсоничне брзине, равна цев би била тако дизајнирана да повеже два града на великој удаљености. Опште је познато да је комфортно путовање за путнике ако је убрзање мање од $1m/s^2$ исто као и у метроу, али нема никакве користи за CFD због сувише дугог трајања симулације. Оног тренутка када возило проведе довољно времена при истој брзини, постоји мали ефекат на евентуално стање протока приликом процеса убрзања и успоравања, што значи да може бити занемарено у раду.

4. РАЗМАТРАЊЕ УГУШЕНОГ ПРОТОКА

За проток у цеви, постоји интресантан феномен, где ваздух убрзава субсонични проток или успорава суперсонични проток уколико ваздух уђе у поље контракција узрокованог обликом возила, који може да изазове угушени проток. Истакнуто Кантровицово ограничење је неопходно размотрити за случај надзвучног или ултразвучног протока у цеви ако се Махов број око ЕТМТ приближава 1. Поред тога изентропично ограничење се може користити да се процени стање протока за подзвучни проток. Ограничење угушеног протока се може изразити на основу два ограничења која су мало пре споменута која описују везу између коефицијента блокирања или коефицијента заобилажења и Маховог броја од надолазећег протока (Ma). Овде је коефицијент блокирања дефинисан као:

$$\beta = \frac{A_{train}}{A_{tube}} \quad [2]$$

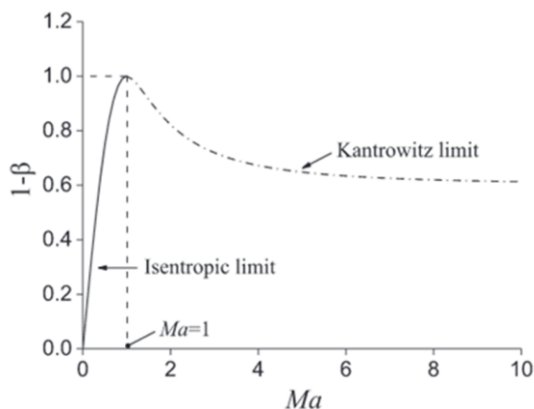
где су A_{train} и A_{tube} делови попречног пресека воза и цеви респективно. Узимајући у обзир модел геометријске симетрије он се може изразити као:

$$\beta = \left(\frac{h_{train}}{r_{tube}} \right) \quad [3]$$

где је h_{train} висина воза, карактеристична дужина ЕТМТ овде и r_{tube} пречник цеви. Ограничење угушеног протока се може приказати преко варијације коефицијента заобилажења и Ma као што је приказано на слици 4. Пуна линија и тачка -линија представљају изентропно ограничење и Кантровиц ограничење респективно. Слика 4 добро објашњава да угушен проток може да се не догоди пошто је коефицијент заобилажења далеко од вредности која одговара Ma за било који надолазећи проток. Уствари, усвојен коефицијент заобилажења би требао да буде већи од оног на криви због губитка вискозитета, термонеутралности (не греје се и не губи топлоту) цевног материјала и др. Не постоји поље контракција пошто је Ma око 1 у теорији. Међутим, мора да дође до пада у делу попречног пресека што доводи до пригушеног протока када се воз налази у цеви. Ово је велики изазов уколико експериментална брзина достигне

максималну брзину (1500 km/h) услед повећања отпора ваздуха и ефекта ударних таласа узрокованих пригушеним протоком.

Као што је приказано на слици 4, пречник цеви конструисан на моделу је 5,751 m тако да је блокада прорачуната на око 0,3.



Слика 4. Веза између коефицијента β , Ma

5. ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА

За разлику од мале брзине, некомприновани проток, различите густине гасова морају се узети у обзир приликом формирања N-S једначина. Заснована на хипотези континуитета и умањеног модела, 2-D асиметрична компресивна N-S једначина протока око ЕТМТ, без спољашњег загревања и сила тела (вагона) је постављена у Картезијанским координатама као:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{1}{y} H \quad [4]$$

где је конзервативна променљива вектор U ; Израз Флуха F , G се односи на правац координата и изворни израз H су формирани респективно.

$$U = (\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho e)^T \quad [5]$$

$$H = \frac{1}{y} \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv + \tau_{xy} \\ \rho v^2 + \tau_{xy} + \tau_{\theta\theta} \\ \rho(e + \rho)v + u\tau_{yy} - k \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} \quad [6]$$

$$F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + \rho - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ (\rho e + \rho)u - u\tau_{xx} - v\tau_{yy} + k \frac{\partial T}{\partial x} \end{pmatrix} \quad [7]$$

$$G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + \rho - \tau_{yy} \\ \rho(e + \rho)v - u\tau_{yx} - v\tau_{yy} + k \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} \quad [8]$$

где је k топлотна проводљивост. Вискозни коефицијент μ дат из модела Sutherland као:

$$\mu = \mu_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1.5} \frac{T_{ref} + S}{T + S} \quad [9]$$

где су μ_{ref} , T_{ref} , S ознаке за вискозни коефицијент, референтна температура и Sutherland константа.

Једначине 4-9 су допуњене са једначином укупне енергије по јединици масе.

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \quad [10]$$

где су γ и ρ специфични топлотни однос и густина гаса.

Укупна разматрања наводе да је за брзине преко 300 км/х на крајим реалцијама или преко 500 км/х на дужим релацијама економски исплативо конструисати железнички трасу у вакуму. Ови прорачуни ипак нису до сада потврђени, зависе од заптивености тубе и нивоа атмосферског подпритиска, али је у претходном раду приказана аеродинамичка основа те перспективе. Железничка возила са потпуном заптивношћу без размене ваздуха са околином већ постоје о остаје још питање конструкција комора за размену атмосферских и вакуумских услова железничке трасе.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Kim, H.D., Setoguchi, T., Kashimura, H., Raghunathan, R., Augmentation of the magnitude of the impulse wave discharging from a tube. *Imech, Part C: J. Mech. Eng. Sci.* 2001 (215) 191-199
2. Kim, T., Kim, K., Kwon, H., Aerodynamic characteristics of a tube train. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 99 (12) 1187-1196
3. Liou, M., A sequel to AUSM: AUSM+ *J. Comput. Phys.* 1996 (129) 364-382
4. Liu, J., Zhang, J., Zhang, W. Analysis of aerodynamic characteristics of a high-speed trains in the evacuated tube., *J. Mech. Eng.* 2013 (1)351-375
5. Jia, W., Wang, K., Cheng, A., et al. Air flow and differential pressure characteristics in the vacuum tube transportation system based on pressure recycle ducts. *Vacuum.* 2018 (150), 58-68
6. Deng, Z., Zhang, W., Zheng, J., et al., A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport test system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017 (27) 1-8
7. Opgenoord, M.M.J., Caplan, P.C., 2018. Aerodynamic design of the hyperloop concept. <https://doi.org/10.2514/1.J057103>

Кратка биографија:



Станислав Алмаши је рођен у Кикинди 31 јула 1991. Запослен је као наставник групе саобраћајних предмета у Техничкој школи „Кикинда“.