

УДК 620.191.33

ОЦІНКА РОБОТОЗДАТНОСТІ ТА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ З КОРОЗІЙНО- МЕХАНІЧНИМИ ДЕФЕКТАМИ

О. Білий

Канд. техн. наук,
Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів

Наведено методику оцінювання допустимої глибини тріщин у металі елементів пароводяного тракту за такими критеріями: критерієм порогової глибини тріщини; критерієм певної граничної швидкості росту тріщини; критерієм ризику крихкого руйнування. Побудовані базові діаграми для конкретного трубопроводу, що експлуатується на Ладизинській ТЕС.

елемент пароводяного тракту, конструкційна сталі, водне корозійне середовище, тріщиноподібний дефект, коефіцієнт інтенсивності напружень, швидкість росту тріщини

Проблема забезпечення надійності та довговічності відповідальних конструкцій та обладнання теплоенергетичної галузі [1 — 3] є актуальною для енергетики України. Слід зазначити, що на кінець 2000 року понад 95 % енергоблоків відпрацювали свій розрахунковий ресурс (100 тис. год), більше половини з них перебувають в експлуатації понад 200 тис. год. До 2008 року частка устаткування з терміном експлуатації 30 і більше років складатиме близько 80 %. При цьому лімітація ресурсу пов'язана з основними елементами ТЕС, зокрема, із системами пароводяного тракту енергоблоків.

Для аналізу робоздатності елементів пароводяного тракту важливою є оцінка можливого ризику руйнування трубопроводів, які знаходяться під дією пульсуючого тиску теплоносія (водного робочого середовища), на основі даних про типові тріщиноподібні дефекти, що виникають на їхніх внутрішніх поверхнях в експлуатаційних умовах.

Базою для цього є методи оцінювання корозійно-механічної пошкоджуваності експлуатованого металу елементів пароводяного тракту, розроблені за підходами механіки корозійного руйнування матеріалів [4, 5].

Основними параметрами для числових оцінок міцності й довговічності є характеристики циклічної тріщиноздатності матеріалів трубопроводів.

Базові діаграми циклічної тріщиноздатності — залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини dc/dN від параметра $\Delta K_I / \sqrt{1-R}$ — побудовані на основі експериментальних даних, отриманих за відповідними методиками випробувань [6]. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням ΔK_{th} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Для сталей трубопроводів базові діаграми циклічної тріщиноздатності мають вигляд прямолінійних ділянок у подвійній логарифмічній системі координат, кожна з яких описана степеневу залежністю типу Паріса:

$$dc/dN = C \cdot \left(\Delta K / \sqrt{1-R} \right)^n, \quad (1)$$

де C і n — константи; R — коефіцієнт асиметрії циклу навантаження.

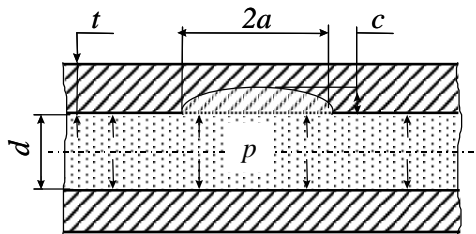


Рис. 1. Модельне подання дефекту в стінці труби з півеліптичною тріщиною

Таблиця 1

Типові початкові дефекти на внутрішній поверхні трубопроводів

Тип дефекту	c/a
Корозійна виразка	0,8
Корозійна виразка	0,6
Корозійна боріздка	0,4
Корозійна боріздка	0,2
Корозійна боріздка	0,1
Корозійна боріздка	0,05
Корозійна боріздка	0,01

Дефект у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром d та товщиною стінки t моделюється півеліптичною тріщиною з розмірами півосей a та c (рис. 1).

Найтипівішими випадками форми початкових дефектів, які виявляються методами неруйнівного контролю при профілактичному огляді трубопроводів в експлуатаційних умовах, є корозійні виразка та боріздка (див. табл. 1).

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I по контуру півеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби (рис. 1) використовується залежність, де ΔK_I виступає як функціонал від таких параметрів: ΔS — розмах напружень розтягу за цикл навантаження; $\Delta S = (\Delta p \cdot d)/2t$; Δp — пульсація (змінна тиску) робочого середовища в трубопроводі за цикл навантаження; d — внутрішній діаметр труби; t — товщина стінки труби; c — глибина тріщини; a — довжина тріщини; θ — кут від малої осі півеліптичної тріщини; k_f — коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового [6]:

$$\Delta K_I = \Phi(\sigma, c, a, d, k_f, t, \theta). \quad (2)$$

Вважається, що тріщиноподібний дефект розвивається з кількістю циклів навантаження N зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей a та c є величиною змінною, тобто:

$$c/a = f(C_m, N), \quad (3)$$

і залежить від системи «матеріал — середовище», що характеризується деякими сталими C_m .

При цьому прийнято, що опір поширенню тріщини, як у напрямі півосі c , так і в напрямі півосі a , повністю

визначається діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу, що отримана при заданих експлуатаційних умовах.

Критерій безпечної експлуатації за пороговою глибиною тріщини. Оцінка корозійно-механічних дефектів тріщиноподібного типу за критерієм порогової глибини c_{th} та форми (c/a) півеліптичної тріщини здійснюється на основі її взаємозв'язку з пороговими значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} (рис. 2). Це дає змогу, враховуючи експериментальні дані про циклічну тріщиностійкість матеріалу труби та дані діагностики стану трубопроводів (тобто розміри та форму тріщин), оцінити потенційну можливість розвитку тріщин у процесі подальшої експлуатації, а також ступінь ризику руйнування трубопроводу.

Тут під пороговим розміром тріщини вважається півеліптична тріщина фіксованої форми c/a глибиною $c = c_{th}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне пороговому: $K_I = K_{th}$. Отже, критерієм безпечного тріщиноподібного дефекту буде умова

$$c \leq c_{th}(\Delta K_{th}) \text{ при } c/a = const. \quad (4)$$

Тобто, всі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною $c \leq c_{th}$ вважаються безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Критерій безпечної експлуатації трубопроводу за граничною швидкістю росту наявних тріщин. Розглянуто випадок розрахунку допустимої глибини c_* тріщини, для забезпечення безаварійної роботи трубопроводу між двома черговими профілактичними оглядами. Його пропонується здійснювати за критерієм приросту Δc виявленого тріщиноподібного дефекту глибиною c_0 , тобто:

$$\Delta c \leq \Delta c_* \text{ при } \Delta N = \Delta N_*, \quad (5)$$

де Δc_* — допустимий приріст тріщини в глибину; ΔN_* — планова кількість циклів навантаження впродовж експлуатації трубопроводу між двома профілактичними оглядами.

Фізично це означає оцінку за деякою граничною швидкістю розвитку корозійно-втомної тріщини впродовж запланованого терміну експлуатації трубопроводу $(dc/dN)_*$:

$$dc/dN \leq (dc/dN)_*. \quad (6)$$

Так, наприклад, якщо ми виберемо значення $(dc/dN)_* = 10^{-4}$ мм/цикл, то це означає, що наявні у трубопроводі тріщини глибиною c_i можуть максимально

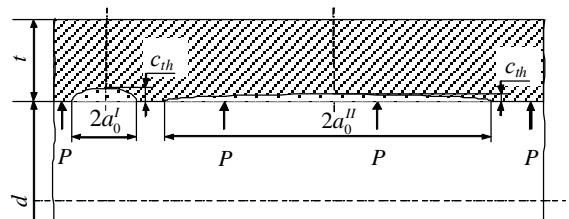


Рис. 2. Схема оцінки безпечної експлуатації труби за пороговою глибиною тріщини

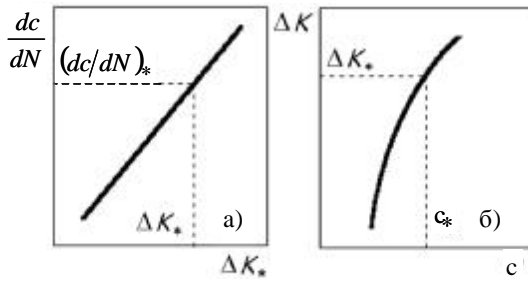


Рис. 3. Схема оцінки безпечної експлуатації трубопроводу за граничною швидкістю росту наявних тріщин

розвинути на 1 мм впродовж 10 тис. циклів навантаження.

Процедура визначення допустимої глибини тріщини c_* у стінці трубопроводу, при заданих значеннях ΔK_* та ΔN_* , є такою.

Спочатку визначають граничну швидкість росту корозійно-втомної тріщини $(dc/dN)_*$ як

$$(dc/dN)_* = \Delta c_*/\Delta N_* \quad (7)$$

За цією величиною, з діаграми циклічної корозійної тріщиногнвкості матеріалу, що розглядається, визначають відповідне значення розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_* (рис. 3,а). На основі цього значення розраховують допустиму глибину тріщини c_* для коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I , яка є функцією робочого навантаження на трубопровід, його геометричних розмірів та геометрії тріщиноподібного дефекту (рис. 3,б).

При розрахунках приймається така величина допустимого приросту наявної тріщини глибиною c_i : $\Delta c_* = 1,0$ мм. Вибір значень ΔN_* здійснено з урахуванням статистичних даних про експлуатацію енергоблоків на деяких електростанціях України, які свідчать, що кількість циклів навантаження на блок складає порядку кількох тисяч [1, 2].

Оцінка ризику крихкого катастрофічного руйнування. Оцінка здійснюється за відомим [1, 6] критерієм механіки крихкого руйнування:

$$\Delta K_I \leq \Delta K_{fc} \quad (8)$$

де ΔK_{fc} — циклічна в'язкість руйнування.

Тут під критичним розміром тріщини розуміється півеліптична тріщина фіксованої форми c/a глибиною $c = c_{fc}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне критичному: $K_I = K_{fc}$.

Таким чином, критерієм критичного тріщиноподібного дефекту буде умова

$$c = c_{fc}(\Delta K_{fc}) \text{ при } (c/a) = const. \quad (9)$$

Всі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною близькою до значення c_{th} є критично небезпечними, оскільки мають потенційну здатність до спонтанного поширення, що призведе до катастрофічного руйнування трубопроводу.

Методика оцінки робоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами. На основі вищенаведених критеріїв для кожного розглянутого трубопроводу можна побудувати спеціальні діаграми в координатах «характеристичні значення глибини тріщиноподібного дефекту — форма дефекту» (рис. 4).

Така діаграма містить три характерні зони. По-перше, це зона безпечної експлуатації трубопроводу, що знаходиться нижче кривої $c_{th} = F_1(a/c)$. Це стосується випадку коли глибина всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів є меншою за порогове значення, тобто $c \leq c_{th}$. Такі дефекти вважаються безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Друга зона — це зона експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів. Це означає, що впродовж певного запланованого терміну експлуатації трубопроводу допускається розвиток існуючих тріщин зі швидкістю, що не перевищує деяку встановлену граничну, тобто $dc/dN \leq (dc/dN)_*$. Значення $(dc/dN)_*$ вибирається в залежності від вимог та норм експлуатації трубопроводу, а також конкретної виробничої ситуації на ТЕС. За вибраним значенням граничної швидкості $(dc/dN)_*$ розраховують криву $c_* = F_2(a/c)$. Усі наявні в трубопроводі тріщиноподібні дефекти глибиною $c_i \leq c_*$ будуть розвиватися зі швидкістю нижче граничної і можуть вважатись умовно безпечними для розглянутого випадку.

Третя зона — зона ризику крихкого руйнування, яка знаходиться вище кривої $c_{fc} = F_3(a/c)$. Тобто, для всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів глибиною $c_i \geq c_{fc}$ реалізується критерій катастрофічного руйнування. Експлуатація трубопроводу з такими дефектами — недопустима.

Приклад розрахунку. За описаною вище схемою були розраховані характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів у живильних трубопроводах енергоблоків за критичного тиску Ладижинської ТЕС, що виготовлені зі сталі 16ГС (рис. 5); з номінальним зовнішнім діаметром $D = 526$ мм; номінальною товщиною стінки в нейтральній зоні $t = 50$ мм. Робочий тиск становив $p = 15,5$ МПа, середовище — корозійне з константами $C = 4,36 \cdot 10^{-22}$ і $n = 18,36$.

Слід зауважити, що проведені раніше дослідження [8] дали підстави зробити важливий висновок про принци-

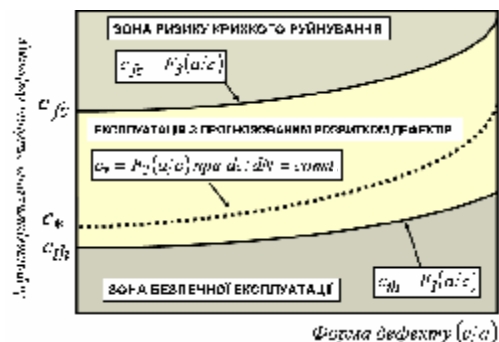


Рис. 4. Діаграма оцінки робоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами

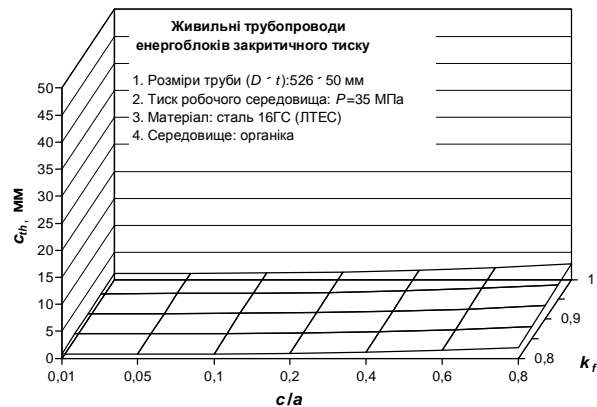
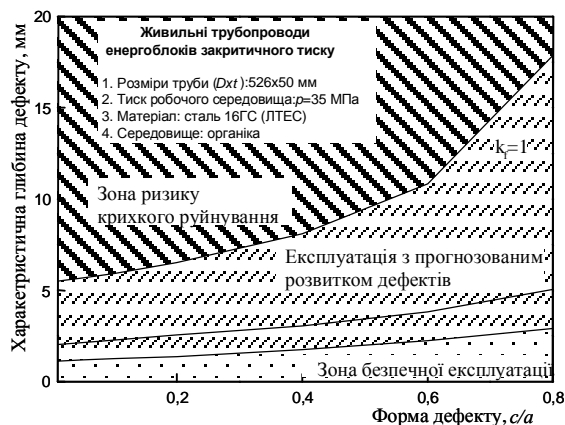
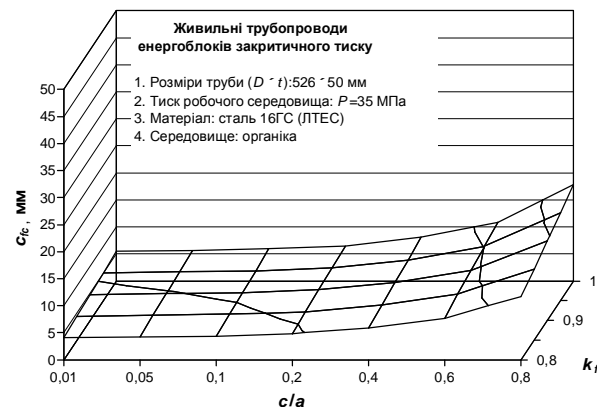
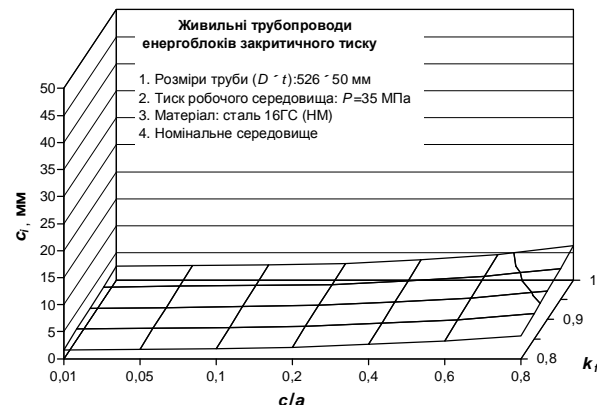


Рис. 5. Діаграми оцінки роботоздатності та ризику руйнування необігрівного трубопроводу котлів високого тиску (метал Ладизинської ТЕС; труба 526×50 мм, середовище — органіка, $k_f=1$)

Таблиця 2

Характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів

c/a	k_f	$c_{th}, \text{мм}$	$c^*, \text{мм}$	$c_{fc}, \text{мм}$
0,01	0,8	0,786	1,346	4,074
	1	1,13	2,018	5,482
0,05	0,8	0,818	1,402	4,21
	1	1,178	2,114	5,674
0,1	0,8	0,858	1,474	4,394
	1	1,234	2,242	5,93
0,2	0,8	0,946	1,642	4,818
	1	1,37	2,538	6,514



пову можливість реалізації механізму водневого окрищення металу в околі тріщиноподібних дефектів у трубопроводах за присутності в теплоносії органічних домішок. Тому існує потреба в оцінці безпечної експлуатації досліджених конструктивних елементів саме в такому агресивному середовищі.

Слід зазначити, що при розрахунках характеристичних значень був врахований також і тип ділянки трубопроводу: прямолінійна ділянка — згин. Це здійснено шляхом вибору різних значень коефіцієнта k_f , що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового. Було прийнято [1, 7], що для прямолінійної ділянки трубопроводу його поперечний переріз залишається близьким до кола, тобто $k_f = 1$, а на згині його значення рівне $k_f = 0,8$. Ці дані подані в табл. 2. Натомість на рис. 6 містяться просторові діаграми глибини дефекту c_{th} , c^* , c_{fc} відповідно до його форми (c/a) та відхилення поперечного перерізу труби від колового (k_f) для розглянутої труби.

Наведені діаграми оцінювання роботоздатності й розрахункові дані можуть слугувати базою для експертних заключень про можливість подальшої експлуатації трубопроводів з дефектами, виявленими при профілактичних оглядах. Тут були враховані такі чинники: фактичний стан металу на ТЕС; реальний склад робочого середовища;

Рис. 6. Просторові діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування необігрівного трубопроводу котлів високого тиску (метал Ладизинської ТЕС; труба 526×50 мм)

геометричні розміри елемента; специфіка експлуатаційних навантажень і форма корозійно-механічноно дефекту.

За підходами механіки руйнування вибрано й обґрунтовано критерії оцінки безпечної експлуатації конструктивних елементів пароводяного тракту з тріщиноподібними дефектами. Зроблено попередні розрахункові оцінки для технічної діагностики роботоздатності основних конструктивних елементів та запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенеруючих системах енергоблоків закритичного тиску ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії.

Література

1. *Механіка* руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л.Тот. Під ред. І.М. Дмитраха. — К.: ВД «Академпериодика», 2005. — 378 с.

2. *Вайнман А.Б.* Современное состояние проблемы коррозии металла пароводяного тракта энергоблоков СКД ТЭС Украины // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2002. — Спец. вип. №3. — С. 44—50.

3. *Мухонад Г.В.* Научно-организационные аспекты обеспечения надежной работы энергооборудования // Энергетика и электрификация. — 1997. — №3. — С. 37—40.

4. *Панасюк В.В., Дмитрах І.М., Вайнман А.Б., Мухонад Г.В.* Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Част. I // Энергетика та електрифікація. — 1998. — №6. — С. 29—35.

5. *Панасюк В.В., Дмитрах І.М., Вайнман А.Б., Мухонад Г.В.* Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Част. II // Энергетика та електрифікація. — 1999. — №1. — С. 34—44.

6. *Дмитрах І.М., Панасюк В.В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. — 1999. — 341 с.

7. РД 34.17.421-92. Дополнения и изменения к „Типовой инструкции по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций”. — М.: СПО ОРГРЭС, 1994.

8. *Дмитрах І, Білий О., Сиротюк А., Сміян О.* Оцінка ризику корозійно-втомного руйнування живильних трубопроводів енергоблоків ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2008. — Спец. вип. №6. — С. 360—363.

Отримана 22.10.08

О. Билы

Assessment of workability and failure risk of the pipeline with corrosion-mechanical defect

Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

The method of assessment of permissible depth of the cracks in elements of water-steam circuit metal is shown in the work. It is based on such criteria: threshold crack depth criterion; some boundary crack growth rate criterion; brittle failure risk criterion. Basic diagrams for the specific pipeline which exploits on Ladysgyn heat power plant are built.

²í ôî òî àö³ÿ

AEROACOUSTICS

March 2009, Munich, Germany

Information: Within the proposed Euromech colloquium “Large Eddy Simulation for Aerodynamics and Aeroacoustics”, novel methods for Large Eddy Simulation (LES) of complex flows and Computational Aero-acoustics (CAA) shall be considered and discussed. As noise prediction by CAA mainly depends on the quality of the simulation of the turbulent flow field, both approaches will be considered as a common topic. Hybrid approaches based on flow field predictions by incompressible solvers will also be a topic. The aim of the colloquium is to assess and improve the state of the art approaches for prediction and analysis of complex turbulent flow fields with special emphasis on prediction and analysis of aerodynamic noise. It therefore establishes a link between classical Fluid Dynamics and Acoustics.

The use of LES for the analysis of turbulent flow fields has become one of the major trends during the past years, since there is a massive requirement of the industry for accurate three-dimensional and time resolved flow predictions, not only for noise predicitions. However, the prediction of high Reynolds number flows with complex

geometry or physics is difficult due to massive computational requirements that often exceed the capacities of the available hard-ware. A number of strategies have been exploited to overcome these bottlenecks, high-order adaptive schemes, implicit sub grid scale modeling, wall models, coupling of LES with Reynolds averaged models (RANS). The impact of these strategies on quality of the solutions and efficiency of the solvers has to be exploited for a broad range of flows. Special emphasis will be set on the prediction of internal and external Aerodynamic effects including aero-acoustic noise. The main classes of problems considered here are wall bounded and free shear flows ranging from channel, duct and pipe flow with distortion over wakes behind bluff bodies to jets and mixing layers.

Contact: *Prof. Dr.-Ing. Michael Manhart*

Fachgebiet Hydromechanik

Arcisstraße 21, 80333 München, Germany

Ph: +49 (0) 89 289 22583

Fax: +49 (0) 89 289 28332; e-mail: m.manhart@bv.tum.de