

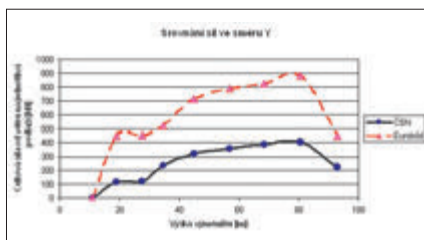
Rekonstrukce technologické věže s ohledem na změněné zatížení větrem podle evropských norem

V cementárně v Čížkovicích nedaleko Lovosic byla v polovině devadesátých let minulého století postavena nová pecní linka. V jejím rámci byl vybudován nový výměník, což je 93 vysoká ocelová věž o osmi podlažích, na kterých je uloženo těžké technologické zařízení. Konstrukce byla v roce 1995 projektována dle tehdy platných českých norem. V loňském roce měla být zahájena rekonstrukce části technologie. Účelem rekonstrukce bylo zvýšení účinnosti zařízení při vypalování slinku. Vzhledem k určitým změnám v zatížení a dispozičním uspořádání bylo nutné provést přepočítání konstrukce dle platných ČSN EN. Problematické se ukázalo zatížení větrem, protože účinky při standardní aplikaci Eurokódů vzrostly až na 250% původních hodnot. Vzhledem ke skutečnosti, že konstrukce sloužila od roku 1996 bez jakýchkoliv problémů, byla rekonstrukce jenom kvůli zatížení větrem neopodstatněná. Proto byl zvolen nový postup stanovení účinků větru na konstrukci a to počítačová simulace působení větru na model reálné konstrukce s uvážením účinků zastínění objektu sousedními stavbami i skutečnou konfigurací terénu. Tento postup umožnil provést rekonstrukci efektivně s ohledem na změny zatížení od technologických zařízení, ale bez nutnosti rekonstrukce kvůli změnám v zatížení větrem.

ÚVOD

Výroba cementu je energeticky vysoce náročný proces. Ve výrobním zařízení, které se schematicky skládá z pece, cyklónů a velkopřůměrových propojovacích potrubí a kanálů, dosahuje teplota 1000 a více stupňů. Proto je v současné době uplatňováno spalování méněhodnotných paliv a odpadů. Vzhledem k velmi vysokým teplotám hoření jsou odpady ve výrobním procesu likvidovány bez ekologických následků.

V roce 1996 byla na základě projektu z předchozího roku v této cementárně postavena nová pecní linka a navazující technologické celky. Součástí pecní linky je také 93 m vysoký výměník, což je ocelová věž nesoucí těžkou technologii výroby slinku. V současné době byla realizována rekonstrukce a doplnění technologického zařízení z důvodu zvýšení efektivity. Při návrhu byl respektován požadavek na minimalizaci stavebních nákladů a jako odborně nejnáročnější se ukázal



Graf 1 – Srovnání zatížení konstrukce větrem dle ČSN a Eurokódů ve směru Y

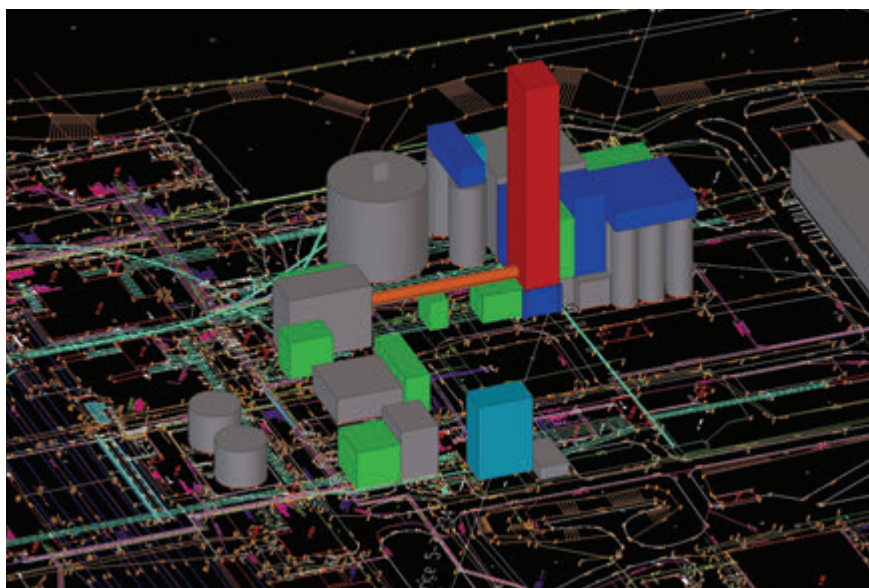
úkol zamezit rekonstrukcí nosné konstrukce pouze z důvodu uplatnění nových evropských norem, především pak normy pro zatížení větrem.

POPIS KONSTRUKCE

Nosná ocelová konstrukce byla v roce 1995 projektována dle tehdy platných norem ČSN 730035 Zatížení stavebních konstrukcí a ČSN 731401 Navrhování ocelových konstrukcí a konstrukce byla realizována v souladu s ČSN 732601 Provádění ocelových konstrukcí. Jedná se o prostorovou nosnou konstrukci o půdorysných rozměrech 13 × 17,5 m (vzdálenosti modulových os) a výšce 93 m – viz obrázek č. 1. Do úrovně +11 m je konstrukce provedena ze železobetonu a nad touto úrovní jako ocelový osmipodlažní skelet.



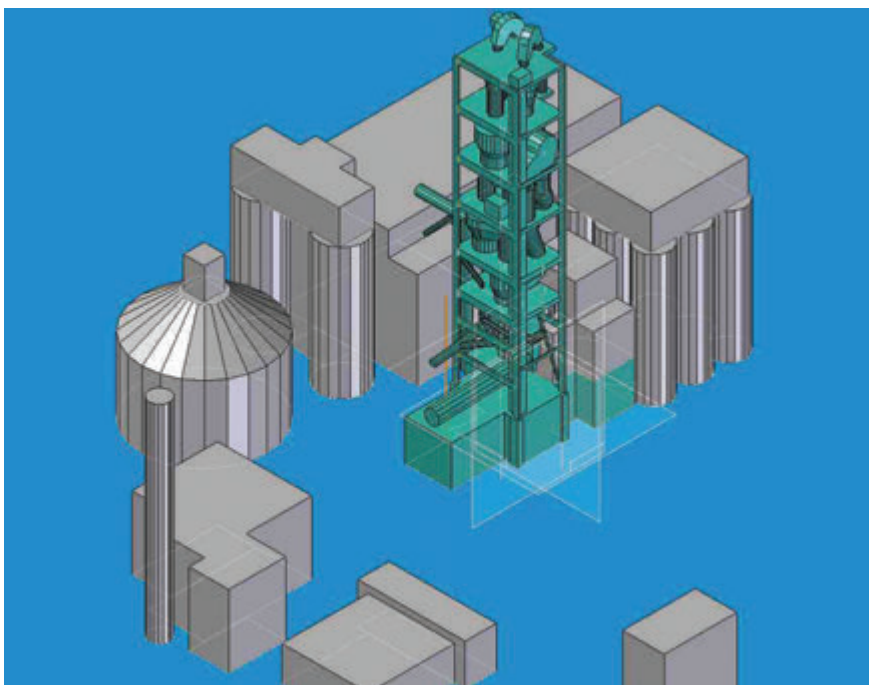
Obr. 1 – Pohled na konstrukci výměníku



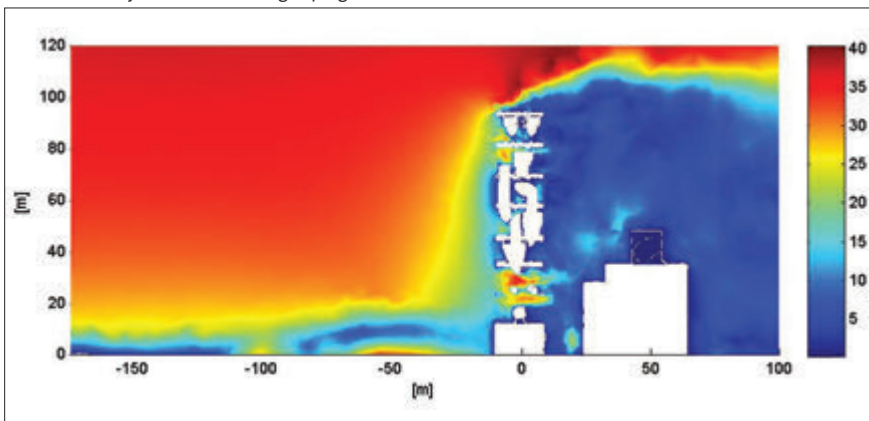
Obr. 2 – Model objektů ovlivňujících výměník vložený do generelu

Zatížení větrem		ČSN 730035 – Původní SV z roku 1995				EN 1191-1-4 – Dnes platný předpis			
		Oblast IV				Oblast II			
		Terén A				Terén kat. II			
Úroveň	H	Síla Px	Síla Py	Moment	Moment	Síla Px	Síla Py	Moment	Moment
	[m]	[kN]	[kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	[kN]	[kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
Kotvení	11	0	0	0	0	0	0	0	0
1.NP	19	146	118	1157	931	256	450	3150	5534
2.NP	28	149	120	2482	1996	259	456	5241	9207
3.NP	35	167	235	3961	5575	298	524	8595	15099
4.NP	45	228	321	7730	10879	407	714	16222	28496
5.NP	57	252	355	11588	16309	450	790	23237	40819
6.NP	68	275	388	15810	22248	470	826	29873	52476
7.NP	81	288	405	20041	28206	504	885	38192	67088
8.NP	93	158	223	12995	18289	258	452	21119	37097
SUMA		1665	2165	4329	8033	2902	5098	8322	19678

Tab. 1 – Srovnání zatížení konstrukce větrem podle ČSN a Eurokódy



Obr. 3 – Model výměníku s technologií v programu COMSOL 3.5



Obr. 4 – Rychlostní pole větru pro vybraný směr

Kotvení ocelové konstrukce je provedeno čtveřicí speciálních ložisek s elastomerem, která zajišťují přenos osových a příčných sil do spodní betonové konstrukce, ale umožňují natočení sloupů v podpoře. Maximální reakce přenášená každým ložiskem je 14 200 kN svisle a až 1 000 kN vodorovně v každém směru.

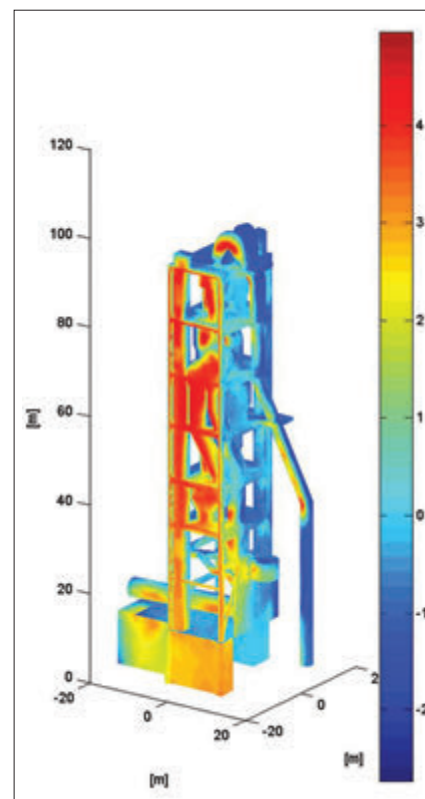
V užším směru 13 m je konstrukce příhradová se ztužidly tvaru ležatého "K", v širším směru 17,5 m je konstrukce rámová s příhradovým ztužením tvaru obráceného "V" pouze ve spodním podlaží. Sloupy a hlavní nosníky jsou svařované I profily výšky až 1 800 mm, ztužení je většinou z bezešvých trubek. Hlavní konstrukce je celosvařovaná, připoje ztužidel a plošinových nosníků jsou šroubované. Technologické zařízení je uloženo na 8 plošinách. Plošiny jsou tvořeny soustavou hlavních nosníků, na které navazují podružné nosníky podlah. Plošiny jsou zakryty žebrovaným plechem s výztuhami.

Technologické zařízení sestává především z cyklónů a velkopříměrových potrubí zhotovených z ocelového plechu. Průměry potrubí i cyklónů jsou až 6 m. Vzhledem k vysokým teplotám uvnitř zařízení až tisíc stupňů je uvnitř žáruvzdorná vyzdívka. Hmotnost jednotlivých částí včetně vyzdívky a případného zánosu se pro jednotlivá podlaží a jednotlivé části technologie pohybuje od 50 do 300 t. Při pravidelných opravách většinou během zimní odstávky je žáruvzdorná vyzdívka vyměňována a konstrukce může být v určitém období výrazně odlehčena.

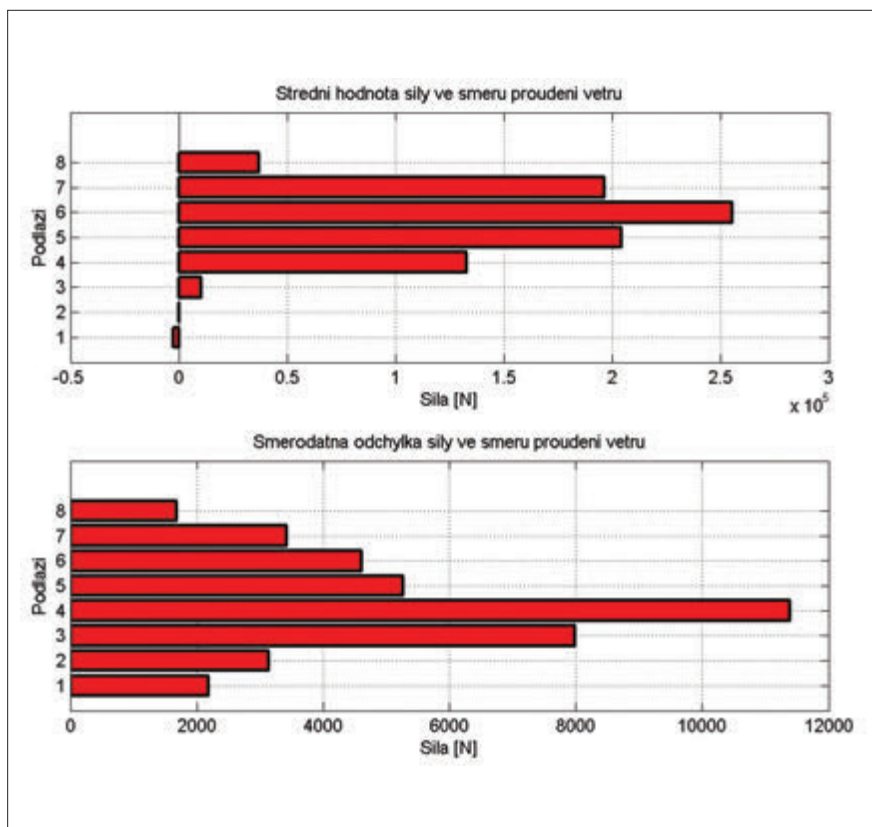
POŽADAVKY NA REKONSTRUKCI

3.1 Změny zatížení a posouzení konstrukcí

Nová úprava technologie si vyžádala zásah od



Obr. 5 – Normované hodnoty tlaku na površích konstrukce výměníku s uvážením turbulentní složky větru pro vybraný směr



Obr. 6 – Síly ve směru proudění větru integrované z normovaných tlaků pro jednotlivá podlaží

hlavních nosníků plošin. Došlo ke změnám zatížení od technologie na jednotlivých plošinách. Tyto změny zatížení vyvolaly změny vnitřních sil a tím se změnil stupeň využití jednotlivých prvků konstrukce. Z tohoto důvodu bylo nutné před samotným zásahem do stávající technologie prověřit statickou únosnost nosné ocelové konstrukce. Jednalo se o zásah do existující konstrukce při změně zatížení a konstrukčního uspořádání ve smyslu ČSN EN 1990.

Konstrukce byla navržena v roce 1995 dle tehdy platných českých, jejichž platnost však byla v dubnu 2010 ukončena. V současné době platí pouze harmonizované ČSN EN. Tyto evropské normy v některých oblastech významně změnil předpoklady původních českých norem užitých při návrhu výměníku. V souladu s ustanoveními ČSN EN 1990 je nutné při novém posouzení měněné konstrukce vycházet z norem platných v době vypracování přepočtu.

Vzhledem k významné změně norem nebylo možné provést nové posouzení pouze lokální části konstrukce přímo dotčené změnou technologie, tedy pouze prověřit upravené plošiny. Nešlo také navázat na závěry původního statického výpočtu, protože nyní se používají jiné součinitele zatížení, jiné součinitele materiálu, odlišným způsobem se předepisují kombinace proměnných zatížení a tím by dodatečný posudek nebyl kompatibilní s původním výpočtem.

Změny v zatížení větrem

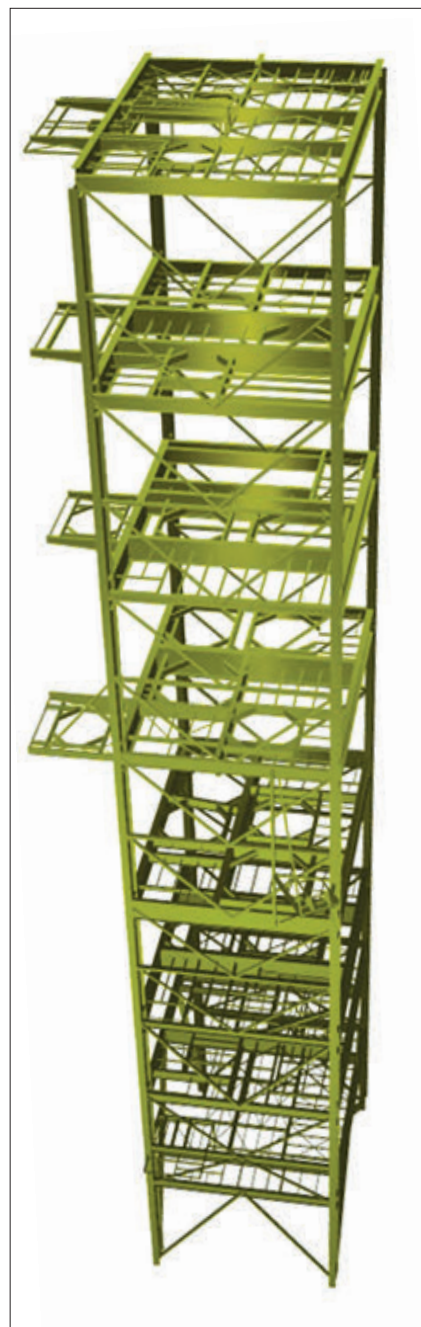
Nejvýznamnější změna mezi ČSN EN a dřívějšími normami je v metodice stanovení velikosti zatížení větrem, jehož absolutní hodnoty se zvýšily

až dvaapůlkrát. Pro zatížení větrem obdobných technologických konstrukcí se standardně uvažuje jako plocha vystavená účinkům větru plný průmět obrysu konstrukce s připočítáním případně přesahující technologií vně tohoto obrysu. Tento postup byl uplatněn i pro návrh konstrukce v roce 1995. Při uplatnění stejného principu plochy průmětu konstrukce vystavené větru a zatížení od větru stanovené dle ČSN EN 1991-1-4 vzrostly hodnoty až na 250 %. Srovnávací hodnoty zatížení větrem jsou v tabulce č. 1 a vybraný směr také v grafu č. 1. Celkové zatížení větrem ve směru $P_x = 1\,665$ kN dle původní české normy vzroste na $P_x = 2\,902$ kN dle evropské normy. Celkové zatížení větrem ve směru $P_y = 2\,165$ kN dle původní české normy vzroste na $P_x = 5\,098$ kN dle evropské normy.

Zatížení větrem dle počítačové simulace

Již při prvním projednávání akce s investorem byl z jeho strany vznesen oprávněný požadavek na minimalizaci nákladů na rekonstrukci. Proto se také odmítl smířit s tím, že by se rozsah rekonstrukce nosné ocelové konstrukce měl zvýšit pouze proto, že se výrazně změnilly hodnoty zatížení větrem dle nově uplatňované evropské normy a oprávněně argumentoval tím, že konstrukce bez problémů slouží již od roku 1996. Proto byl také z jeho strany akceptován postup projekčně dražší, ale v celkových nákladech na rekonstrukci levnější způsob nalezení věrohodného zatížení větrem.

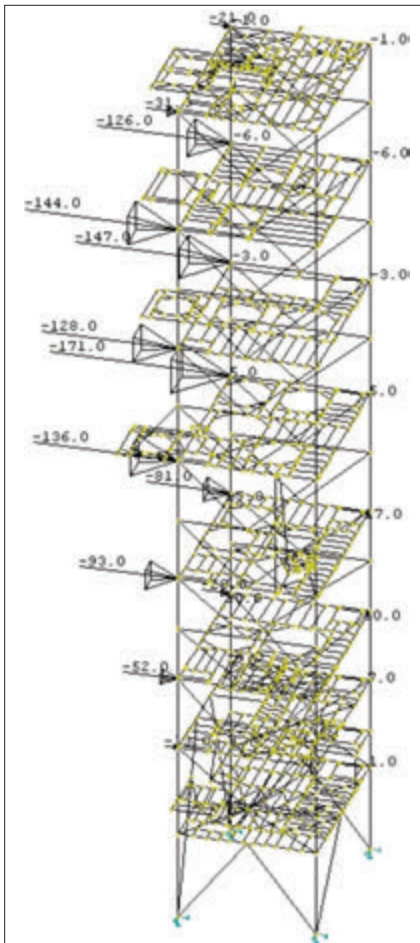
Jednoznačné zadání investora bylo řešeno ve spolupráci s Ústavem teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v rámci vědecké činnosti v oblasti proudění větru a vlivu větru na reálné konstrukce. Teoreticky se jedná o analýzu proudění, která je



Obr. 7 – Model výměníku pro globální statickou analýzu

založena na numerickém řešení stabilizovaných Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou tekutinu. Numerická nestabilita vyplývající z dominantní hodnoty konvektivního členu rovnice je redukována pomocí kombinace Galerkinovy variační metody a metody nejmenších čtverců. K výpočtu byl použit výpočetní program COMSOL 3.5 od firmy COMSOL Multiphysics™ sloužící k hledání slabého řešení uživatelem volené okrajové úlohy pomocí metody konečných prvků.

Simulace proudění vzduchu o teplotě 20 °C kolem konstrukce je provedena jako nestacionární po dobu 60s. Během tohoto časového intervalu, jenž byl zvolen vzhledem k velikosti posuzované stavby a rychlosti proudění, dochází k vývoji větrných vírů a tlaků, jenž mají zásadní vliv na velikost zatížení. Dále model uvažuje tři typy okrajových podmínek. Na vstupu do výpočtových



Obr. 8 – Zatížení statického modelu výměníku větrem

oblasti je definovaná rychlost vzduchu splňující profil kategorie terénu II příslušné normy ČSN EN 1991-1-4. Turbulentní složka rychlosti

je zanedbána. Rychlost na plášti budov a terénu je nulová, zatímco na otevřené hranici výpočtové oblasti jsou definovány podmínky neutrálního chování. Na výstupu je stanovena podmínka nulového tlaku.

Dělení výpočetní oblasti na konečné prvky je provedeno pomocí nestrukturovaného síťování s proměnlivou velikostí prvků Lagrangeova typu. Hustší dělení je využito v blízkosti posuzovaného objektu. Se vzdáleností se velikost prvku proporcionálně zvyšuje až do limitní hodnoty. Vzhledem k rozsahu této okrajové úlohy je k řešení soustavy lineárních rovnic využita iterační metoda GMRES postavena na hledání aproximačního řešení s využitím vektoru v Krylově podprostoru (podrobněji viz Li, G: A block variant of the GMRES method on massively parallel processors, *Jurnal of Parallel Computing*, 23(8), pp. 1005-1019, 1997). Délka integračního časového kroku Δt je omezena hodnotou 0.05 s.

Silový účinek větru na konstrukci výměníku je stanoven metodou Lagrangeových multiplikátorů. Tím se sice výrazně zvyšuje počet stupňů volnosti řešené úlohy, na druhou stranu tato metoda umožňuje učit silovou reakci od větru na plášti konstrukce ve všech směrech s uvážením třecích sil. Následnou integrací odpovídajících složek multiplikátorů přes plochu pláště vybraného objektu získáme vektor síly závislý na čase. Střední hodnotu zatížení poté získáme aritmetickým průměrem hodnot tohoto vektoru.

Pro stanovení zatížení větrem byl vytvořen počítačový model samotného výměníku s rozhodujícími technologickými zařízeními a dále okolní objekty včetně konfigurace terénu. Tím byly zohledněny parametry, které mají vliv na proud větru ofukující řešenou technologickou konstrukci. Model pro simulaci větru je na obrázcích č. 2 a 3.

Výsledkem výpočtu byly grafy rychlostí větru, jejich ukázka je na obrázku č. 4 a především normované hodnoty tlaku větru na površích konstrukce výměníku s uvážením turbulentní složky větru pro vybraný směr, jejich ukázka pro jeden směr je na obrázku č. 5. Výsledné tlaky byly integrovány do výsledných sil pro jednotlivá podlaží, která posloužila jako vstupní údaje pro globální statickou analýzu.

ZÁVĚR

Výsledné síly podle počítačové simulace byly uplatněny v globální statické analýze konstrukce. Model konstrukce pro globální analýzu je na obrázku č. 7 a vybrané zatížení větrem je na obrázku č. 8.

Síly podle této analýzy byly velmi podobné silám, vypočteným v roce 1995 pro zatížení větrem dle ČSN 730035. V rámci globální analýzy tedy nedošlo k významné změně v zatížení větrem uplatněným v novém posudku konstrukce. Aplikací zvoleného novátorského přístupu k věrohodnému zatížení větrem se také podařilo vyhovět požadavku investora na minimalizaci nákladů na rekonstrukci nosné ocelové konstrukce. Statický posudek prokázal nutnost rekonstruovat pouze ty části konstrukce, kterých se přímo týkala realizovaná změna technologických zařízení. Za cenu zvýšených nákladů na projekční činnost se významně snížily náklady na stavební práce při dodržení požadavků na míru bezpečnosti nosné ocelové konstrukce.

Ing. Jaroslav Vácha, Excon, a.s.

Ing. Radomil Král, Ph.D., Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR

Reconstruction of technological towers with regard to altered wind load according to European standards

At the cement plant in Čížkovice not far from Lovosice a new kiln line was built in the mid-1990s. A new exchanger was built there which is a 93 m high steel tower covering eight floors which stores heavy technological equipment. The structure was designed in 1995 according to the then valid technical standards. Last year the reconstruction was to begin of the technological part. The purpose of the reconstruction was to increase the efficiency of the clinker burning equipment. In view of certain changes in the load and layout, it was necessary to convert the structure according to valid ČSN EN standards. It turned out that the wind load was a problem because the effects at a standard application of Euro codes have risen to 250 % of the original values. In view of the fact that the structure worked well from 1996 without any problems, the reconstruction due to the wind load was unjustified. Therefore, a new procedure was chosen of determining the effects of the wind on the structure by computer simulation of the action of the wind on a model of the real structure with the considered wind shadow effects of the neighbouring buildings and the actual terrain configuration. This procedure allowed effective reconstruction with regard to a change in the load arising from the technological equipment but without the need for reconstruction due to changes in the wind load.

Реконструкция технологической башни, учитывая изменения нагрузки ветра в соответствии с европейскими нормами

На цементном заводе в Чижковичах недалеко от Ловосице в середине девяностых годов прошлого века была построена новая печная линия. В рамках этого проекта был построен новый обменник - стальная восьмизэтажная башня высотой 93 метра, на которой расположено тяжелое технологическое оборудование. Эта конструкция в 1995 году была спроектирована в соответствии с действующими в то время чешскими нормами. В прошлом году должна была начаться реконструкция с изменением части технологического процесса. Целью реконструкции было повышение мощности оборудования при обжиге клинкера. Принимая во внимание изменения нагрузки и размещения, необходимо было провести новые расчеты для конструкции в соответствии с действующими нормами ЕС. Проблематичной оказалась нагрузка ветра, так как воздействие при стандартном применении Еврокодов возросло на 250% по сравнению с первоначальными данными. В связи с тем, что конструкция с 1996 года служила без каких-либо замечаний, проводить реконструкцию только из-за воздействия ветра было бы нецелесообразно. Поэтому был избран новый подход для определения влияния нагрузки ветра на конструкцию при помощи компьютерной симуляции влияния ветра на модель реальной конструкции с учетом защиты объекта от ветра соседними зданиями и с учетом конфигурации местности. Этот подход дал возможность провести реконструкцию эффективно, с учетом изменений нагрузки от технологического оборудования и без необходимости реконструкции из-за изменений нагрузки ветра.