

3.1 Equipment

An apparatus was designed, based on an optical length of one metre, to measure luminous intensity in the γ plane for the quadrant 0° to 90° . The apparatus was installed beneath a 330 mm diameter pipe in the roof space of the Mulberry Building (a general purpose teaching building) at Liverpool University (see Figure 1). Due to space restrictions the apparatus could be used only for pipe lengths 610 and 1220 mm and for two C-planes, namely, 0° and 30° . Light was measured using a recently calibrated photocells connected to a datalogger which also recorded simultaneous external illuminance. The measurement area was blacked-out so as to prevent stray light affecting the cell readings.



Data on nadir illuminance and flux output was collected from eleven pipe configurations mounted in a 2 m x 1.5 m garden shed, which was lined with hardboard to prevent light penetration to the test area, and painted matt black (see Figure 3). The pipes were installed at roof level 1600 mm above the floor on which measurements were made. Matt black curtains were hung to separate each of the pipes to prevent them contributing to the measurements taken from adjacent areas, thus allowing the measurement of the direct component of illuminance at nadir. There was also a facility to black out any area in order to record data from combinations of pipes. The pipes were all 610 mm long of the following diameters: 200 mm, 330 mm, 450 mm and 530 mm.



Figure 2 Photometric integrator for flux measurement

3.2 Results

The apparatus described above was used to measure luminous intensity from two 330 mm diameter pipes of 610 and 1220 mm length each equipped with opal diffusers. Readings were taken (not continuously) through the period September 1999 to November 1999 with the apparatus aligned South ($C=0^\circ$). For a period in December 1999 the apparatus was

positioned for $C=30^\circ$ (approximately SSE). Sky conditions for the period were predominately overcast or cloudy with external horizontal illuminance only exceeding 25,000 lux for about 10% of the readings. Using spreadsheet software the readings for the γ plane for the overcast and cloudy conditions were averaged and plotted on the same scale. The resulting polar curve, shown in Figure 4, applies to pipes of both lengths. Application of

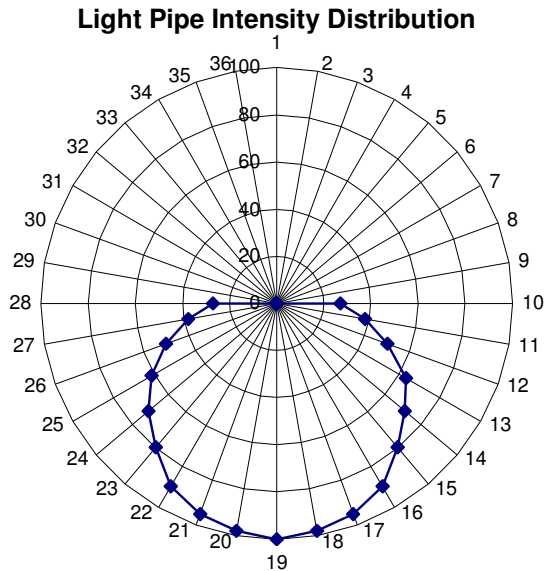


Figure 4 Polar curve of average luminous intensity distribution from overcast sky

the same technique to the data for the 30° orientation gave similar results. Preliminary analysis of the small amount of data for clear sky/sun indicated that a very similar polar curve resulted but collection of this data continues. The integrator apparatus was used to measure pipe output flux from two installations: the Mulberry Building and Pleasant Street School, Liverpool. The nadir illuminance at a vertical distance greater than five times the diameter of the emitter was also measured. The latter was used to calculate nadir luminous intensity. The total flux output was calculated using the method based on zone factors for a symmetric luminaire set out in CIBSE TM5. The results, shown in Table 1, indicate differences between the data sets not exceeding 10%. This may be considered within the acceptable accuracy of the essentially field measurement methods used in this work.

Installation	Measured flux	Calculated flux
Mulberry Building 1	585	578
Mulberry Building 2	371	414
Pleasant Street School 1	569	523
Pleasant Street School 2	540	500

Table 1 Comparison of measured and calculated flux output

The techniques of flux measurement and calculation were used to investigate the relationship

of pipe efficiency and aspect ratio. The techniques of flux measurement and calculation were used to investigate the relationship of pipe efficiency and aspect ratio.

Pipe input was calculated as a function of external horizontal illuminance and pipe cross-section area. Pipe output was either measured (Mulberry and Pleasant Street) or calculated as described above. Note that data for three cases was taken from Reference 3. Figure 5 shows the relationship for pipes under overcast skies.

4 Discussion

Measurements of luminous intensity over a period of some 10 weeks produced a consistent pattern of distribution from a 330mm diameter pipe under overcast and cloudy skies. The indications are that a similar distribution applies for clear sky/sun and measurement to confirm this continue. No measurements of luminous intensity have been made to date for pipes of other diameters, but since the geometry of pipe and diffuser are proportionate for other sizes produced by this manufacturer it has been assumed for subsequent work in this paper that the same distribution applies.

On the evidence of comparison of the two methods of determination of flux output from a pipe, the calculation method based on a value of nadir illuminance can be employed as a tool to give estimates within 10%. It can thus be used for determination of flux output for in locations where the use of the calibrated integrator apparatus is inconvenient.

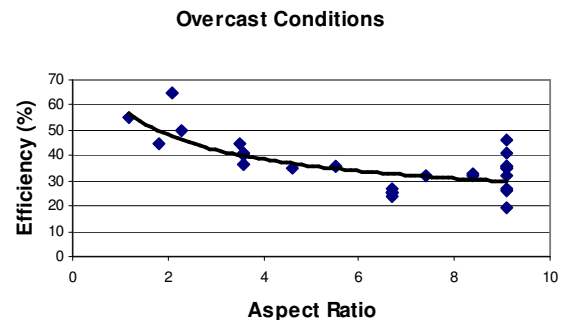


Figure 5 Graph of pipe efficiency against aspect ratio.

Figure 5 shows attenuation of light output with aspect ratio based on the results of 25 cases of 330, 450 and 530 mm diameter all lined with material with specular reflectance of 95%. The graph can be used to estimate flux output for a known pipe configuration and given sky conditions. Furthermore a combination of flux output from the pipe and its luminous intensity distribution can be used to predict illuminance values from pipe installations. Table 2 illustrates measured and calculated values of illuminance using a known flux output and the overcast sky

polar curve for a section of internal corridor at Pleasant Street School, Liverpool. The 450 mm diameter pipes are located 2.4 m above the floor and spaced centrally 7.7 m apart. The values in Table 2 are for points on the floor. The calculated values are for direct light only and hence are slightly lower than measured. Despite this the general agreement between the sets is below 10% until the distance of 2 m, and only exceeded where illuminance magnitudes are very small and difficult to quantify using field measurement techniques.

Location	Measured 1	Measured 2	Calculated 1	Calculated 2	% Error 1	% Error 2
Nadir	31.5	22.5	30.7	21.7	2.5	4.4
1 m from nadir	22.5	17.3	22.0	17.3	2.2	0.0
2 m from nadir	11.5	7.5	10.5	7.3	8.6	2.6
3 m from nadir	6.0	5.0	5.5	4.3	8.3	14.0
4 m from nadir	5.0	4.0	4.4	3.4	12.0	15.0

Table 2 Comparison of measured and calculated planar illuminance.

Note : Case 1 External illuminance = 14,000 lux. Case 2 External illuminance = 9,700 lux

The above calculation methods can form the basis of a method to predict quantitative performance in a wide range of system configurations using the main design criterion - daylight factor. For a given external illuminance and flux attenuation from Figure 5 the flux output can be estimated. This information, together with the known intensity distribution means that a pipe can be considered for calculation purposes to be a conventional luminaire.

5 Conclusions

This paper is an interim report on work in progress. Results to date suggest that passive pipe systems using existing technology have great potential as an electric light source substitute for a number of applications. The imminent arrival on the market of materials with a specular reflectance of the order of 98% offers even greater possibilities in the use of longer length passive light pipes. The work points the way toward the development of a system that will enable quantitative evaluation of proposed systems and enable answer to questions such as 'How many pipes are required to give a particular daylight factor distribution in a space? To this end the

techniques advanced in this paper will, when fully developed, be incorporated into, or used alongside, existing calculation methods for daylight factor.

6 References

1. Love J A. and Dratnal P, Photometric comparison of mirror light pipes, Unpublished report, University of Calgary, 1995
2. Harrison S J, McCurdy G G, Cooke R, Preliminary evaluation of the daylight and thermal performance of cylindrical skylights, Proc. of International Daylight Conference, Ottawa, Canada, 1998
3. Oakley G, Riffat S B, and Shao L, Daylight performance of lightpipes, Proceedings of the CIBSE National Conference, Harrogate, 159-174, 1999
4. Shao L, Elmualim A A and Yohannes I, Mirror light pipes: daylighting performance in real buildings, Lighting Research and Technology, 30 (1) 37-44, 1998

Acknowledgement

The financial and technical support of Monodraught Ltd., High Wycombe, Bucks HP12 3SE is gratefully acknowledged. The passive light pipe systems used in this work are SunPipes. The assistance of Craig Bajda in taking the measurements is acknowledged.

David J CARTER

MSc, PhD, CEng, FCIBSE, FILE

School of Architecture, University of Liverpool
Liverpool L69 3BX, UK

Tf.: + (44) 0151 794 2622; Fax: +(44) 0151 794 2605

E-mail: eb09@liv.ac.uk

Reader in the School of Architecture and Building Engineering at the University of Liverpool in England. He graduated from University of Manchester in Building Technology in 1970 and got his Masters degree from the same University in 1971. After working for a number of consulting engineering and

contracting companies he acquired his Doctorate from the University of Liverpool and took up a post at Liverpool. Dr. CARTER has researched a number of aspects of lighting including daylight systems, interior lighting design methods, interior lighting quality, control systems and remote source systems. He is author of over 90 technical papers. Dr. CARTER is Deputy Chairman of the CIBSE Lighting Division Technical Committee and is Chairman of CIE Technical Committee 3-31.

Intrat în redacție – 3.01.2001

TUBURI DE LUMINĂ PASIVE

Rezumat

Tuburile de lumină pasive constau din secțiunea de transport a unui tub de lumină care are la capătul superior un dispozitiv de captare a luminii naturale, iar la capătul inferior un dispozitiv de distribuție a luminii. spre interior. Utilizarea mai largă a sistemelor este limitată în prezent de lipsa metodelor cantitative de proiectare, altele decât cele bazate pe date empirice. Această lucrare prezintă rezultatele preliminare privind fluxul luminos și distribuția intensității luminoase pentru diferite configurații ale tuburilor pasive de lumină solară, bazate pe măsurători efectuate în laborator și pe teren. Pe lângă indicarea performanțelor cantitative ale tuburilor pasive de lumină, analiza rezultatelor propune calea de urmat pentru predicția performanțelor unei game largi de configurații ale sistemului.

1 Introducere

În ultimii ani s-au întreprins cercetări considerabile asupra tuburilor de lumină, ca dispozitive de transport sau emițătoare de lumină în spații interioare. Majoritatea sistemelor în uz utilizează lămpi electrice sau dispozitive de captare a lumii solare ca surse luminoase și, deci, se bazează pe un echipament costisitor pentru a capta, transporta și distribui lumina. Cercetările recente s-au focalizat pe tuburile pasive de lumină, ca mijloace de iluminat interior. Pentru a transporta și distribui lumina, aceste dispozitive funcționează conform principiilor sistemelor solare sau electrice, dar, datorită simplității lor, sunt mai ieftin de construit și întreținut.

Tuburile pasive constau, în principal, dintr-o parte verticală de tub de transport a luminii și sunt prevăzute la capătul superior cu un dispozitiv de captare a luminii naturale care previne infiltrarea vântului și ploii, iar la capătul inferior cu un dispozitiv de distribuție a luminii în interior. Capătul superior al tubului poate fi orizontal sau înclinat la un anumit unghi față de axa tubului. Tubul poate fi căptușit cu un material argintat puternic reflectant, dar nu conține lentile sau alte mijloace de redirecționare a luminii. Pentru a transmite lumina, peretele interior al tubului asigură o reflexie multiplă a acesteia. În general, transmiterea luminii este funcție de reflectanța suprafeței, unghiurile de intrare a luminii incidente și de proporțiile tubului în sensul raportului dintre lungime și suprafața secțiunii transversale. Dacă calea luminii este lungă în comparație cu lungimea axială, numărul reflexiilor este mai mare și deci pierderile de lumină depind într-o mare măsură de reflectanța materialului peretelui. Pentru a minimaliza numărul reflexiilor, lumina trebuie să pătrundă în tub cât mai aproape de fluxul axial.

Pe piață sunt disponibile câteva sisteme de tuburi pasive. Acestea conțin o boltă (calotă) policarbonată transparentă, tuburi rigide sau flexibile căptușite cu material reflector și un dispozitiv reflector de lumină confecționat din material opal sau prismatic. Tuburile rigide pot fi prevăzute cu curburi. Se pot modifica sistemele de bază prin îndoirea capătului

superior al tubului cu un unghi oblic și înclinarea acestuia spre ecuator. Această “lingură de lumină (light scoop)” are ca efect creșterea fluxului luminos al tubului cu un factor de până la doi în cazul unui cer senin cu soare și un efect negativ în condiții de cer acoperit.

Studiile privind sistemele de tuburi pasive au oferit date empirice de performanță pentru cazuri particulare de configurare a sistemului și în condiții locale de lumină naturală, aceste date putând fi aplicate pentru proiectarea unor sisteme similare. Toate studiile indică că sistemele de tuburi pasive au un potențial considerabil ca sursă primară de lumină pentru unele tipuri de spații interioare.

Această lucrare prezintă rezultatele preliminare ale fluxului luminos și distribuției intensității luminoase pentru diferite configurații ale tuburilor pasive de lumină solară, bazate pe măsurători efectuate în laborator și pe teren. Pe lângă indicarea performanțelor cantitative ale tuburilor pasive de lumină, analiza rezultatelor propune calea de urmat pentru predicția performanțelor unei game largi de configurații ale sistemului.

2 Tuburi pasive de lumină ca alternativă a iluminatului

S-au întreprins o serie de investigații privind performanțele tuburilor pasive de lumină. Love și alții [1] a comparat secțiunile de transport ale unui număr de tuburi de lumină cu oglindă disponibile pe piață. S-au utilizat tuburi de fixare deasupra unei camere cu integrare și s-a măsurat simultan iluminarea în integrator și iluminarea exterioară, permițând astfel determinarea funcției de transfer a diferitelor combinații de tuburi curbe și drepte. Harrison și alții [2] a măsurat simultan iluminarea nadir și iluminarea exterioară de la un singur tub în condiții de laborator. Rezultatele au indicat că factorul de lumină naturală nadir (raportul iluminare interioară/exterioară) se încadrează între 0,5% în condiții de cer acoperit și 0,2% pentru cer senin. S-au măsurat date privind planul de lucru și/sau simultan iluminarea nadir și cea exterioară pentru instalații existente [3]. Un studiu suplimentar a sugerat că factorii lumină naturală până la 1,0% pot fi obținuți pentru

tuburi cu formatul imaginii (raportul între lățimea și înălțimea imaginii) mai mic de șase [4].

Din literatură este evident că s-au stabilit informațiile de bază privind proprietățile de transmitere a luminii ale tuburilor cu diferite configurații și date privind valorile iluminării plane în diferite circumstanțe. Informațiile de transmitere a tuburilor fac posibilă estimarea fluxului luminos în condiții meteorologice date și aceasta, împreună cu diferite valori măsurate ale iluminării pe planul de lucru și nadir, poate servi ca regulă de bază în proiectare. Aceasta nu rezolvă însă problema predicției performanțelor instalațiilor care nu seamănă cu cele măsurate.

3 Investigații experimentale

Lucrarea a studiat fluxul luminos emis, distribuția intensității luminoase și distribuția iluminării pentru un număr de configurații ale tuburilor pasive de lumină solară, pe baza măsurătorilor combinate efectuate în laborator și pe teren.

3.1 Echipament

S-a proiectat un aparat caracterizat de lungimea optică de un metru pentru a măsura intensitatea luminoasă în planul γ pentru cadranul $0^\circ - 90^\circ$. Aparatul a fost instalat sub o tub cu diametrul de 330 mm pe acoperișul clădirii Mulberry a Universității din Liverpool (vezi figura 1). Datorită restricțiilor impuse de spațiu, aparatul poate fi utilizat doar pentru tuburi cu lungimi de 610 și 1220 mm și pentru măsurători în două planuri C – 0° și 30° . Lumina a fost măsurată utilizând fotocelule calibrate conectate la o datalogger care înregistrează simultan și iluminarea exterioară. Suprafața de măsură a fost camuflată ca o cutie neagră, astfel încât să prevină penetrarea luminii difuze care ar afecta citirile celulei.

Fluxul luminos emis de tuburi a fost măsurat utilizând o cutie cubică care a aproximat caracteristicile unui fotometru integrator. Cutia este formată dintr-o epruvetă cubică din placă dură din fibră cu lungimea de 0,8 m, cu îmbinări interioare etanșate și acoperită în interior cu vopsea albă mată. S-au construit trei calote separate pentru cutie, cu găuri de diferite mărimi în centru pentru a

realiza trei dimensiuni diferite ale tubului. S-a utilizat o fotocelulă montată central pe o buclă de 20 cm cu fața spre baza cutiei pentru a măsura iluminarea în timp ce funcționează ca propriul deflector pentru lumina direct de la sursă. Cutia a fost calibrată în laboratoarele unui fabricant important de lămpi, utilizând lămpi cu flux luminos cunoscut pentru fiecare dintre calote. Integratorul este prezentat în figura 2.

Datele privind iluminarea nadir și fluxul luminos au fost colectate de la 11 configurații de tuburi montate pe o baracă de 2 m x 1,5 m, care a fost căptușită cu placă pentru a preveni penetrarea luminii în suprafața testată și vopsită negru mat (vezi figura 3). Tuburile au fost instalate la nivelul acoperișului, la 1600 m distanță de sol, nivel la care au fost efectuate măsurătorile. Au fost atârname draperii negre mate pentru a separa fiecare tub și pentru a preveni contribuția acestora la măsurările din suprafețe adiacente, permițând astfel măsurarea componentei directe a iluminării nadir. S-a mai utilizat și camuflarea oricărei suprafețe pentru a înregistra date din combinații de tuburi. Toate tuburile aveau lungimea de 610 mm cu următoarele diametre: 200 mm, 330 mm, 450 mm și 530 mm.

3.2 Rezultate

Aparatul descris mai sus a fost utilizat pentru a măsura intensitatea luminoasă pentru două tuburi cu diametru de 330 mm și lungimi 610 și 1220 mm, echipate fiecare cu reflector opal. Citirile au fost efectuate (discontinuu) în perioada Septembrie 1999 - Noiembrie 1999 cu aparatul aliniat la sud ($C = 0^\circ$). Pe perioada lunii Decembrie 1999 aparatul a fost poziționat pentru $C = 30^\circ$ (aproximativ SSE). În această perioadă vremea a fost predominant cu cer acoperit sau noros, iluminarea orizontală exterioară depășind 25.000 lux pentru numai 10% din citiri. Utilizând software pentru analizarea informațiilor cuprinse în tabele, s-a făcut media valorilor citirilor pentru planul γ în condiții de cer acoperit și noros și au fost reprezentate grafic pe aceeași scară. Curba polară rezultată, prezentată în figura 4 se aplică tuburilor cu cele două lungimi. Se obțin rezultate similare aplicând aceeași metodă pentru

datele din cazul orientării la 30° . Analiza preliminară a câtorva determinări pentru cer senin și cu soare au indicat că a rezultat o curbă polară foarte asemănătoare, dar colectarea acestor date continuă.

Aparatul integrator a fost utilizat pentru a măsura fluxul luminos la ieșirea din tub pentru două instalații: Mulberry Building și Pleasant Street School din Liverpool. De asemenea, s-a măsurat iluminarea nadir pe o distanță verticală mai mare de 5 ori diametrul emițătorului. Aceasta s-a utilizat pentru calculul intensității luminoase nadir. Fluxul luminos total a fost calculat utilizând metoda bazată pe factorii zonali pentru un corp de iluminat simetric stabilit în CIBSE TM5. Rezultatele prezentate în Tabelul 1 arată că diferențele dintre date nu depășesc 10%. Aceasta poate fi considerată în limitele acceptabile de acuratețe a metodelor esențiale de măsurare ale câmpului utilizate în această lucrare.

Metodele de calcul și de măsurare a fluxului au fost utilizate pentru a defini relația dintre eficiența tubului și formatul imaginii. Intrarea (input) a fost calculată ca o funcție de iluminarea orizontală exterioară și suprafața secțiunii transversale a tubului. Ieșirea (output) a fost fie măsurată (Mulberry and Pleasant Street), fie sau calculată așa cum s-a descris mai sus. Datele pentru trei cazuri au fost luate din Referința 3. Figura 5 prezintă corelațiile pentru tuburi în condiții de cer acoperit.

4 Discuții

Măsurările intensității luminoase pe o perioadă de 10 săptămâni au alcătuit un model consistent de distribuție pentru o tub cu diametru de 330 mm în condiții de cer acoperit și noros. Se arată că o distribuție similară se aplică și în condiții de cer senin și însoțit, măsurarea pentru a confirma aceasta continuând. Nu s-a efectuat nici o măsurare a intensității luminoase pentru tuburi cu alte diametre, dar dacă geometria tubului și a reflectorului sunt proporționale pentru alte dimensiuni produse de același producător, în această lucrare s-a presupus că se aplică aceeași distribuție.

În vederea comparației celor două metode de determinare a fluxului luminos emis de tub, metoda de calcul bazată pe valoarea iluminării nadir poate fi utilizată ca instrument pentru a oferi estimări de 10%. Astfel, aceasta se poate utiliza pentru determinarea fluxului luminos în spațiile unde utilizarea integratorului calibrat este incomodă.

Figura 5 prezintă atenuarea fluxului luminos funcție de formatul imaginii pe baza rezultatelor obținute de la 25 de tuburi cu diametre de 330, 450 și 530 mm, toate căptușite cu material cu un grad de reflexie regulată de 95%. Graficul poate fi utilizat pentru a estima fluxul luminos pentru o configurație cunoscută a tubului în condiții meteo date. Mai mult, o combinație între fluxul luminos al tubului și distribuția intensității luminoase poate fi utilizată pentru a prezice valorile iluminării de la o rețea de tuburi. Tabelul 2 ilustrează valorile iluminării măsurate și calculate utilizând un flux luminos cunoscut și o curbă polară în condiții de cer acoperit pentru o secțiune a coridorului interior de la Pleasant Street School din Liverpool. Tuburile cu diametrul de 450 mm sunt amplasate la o distanță de 2,4 m de la sol și spațiate central la distanța de 7,7 m una de alta. Valorile din tabelul 2 sunt punctele de pe sol. Valorile calculate sunt numai pentru lumina directă și sunt cu ceva mai mici decât cele măsurate. În ciuda acestui fapt, concordanța generală între seturi este sub 10% până la distanța de 2 m și depășită acolo unde mărimea iluminării este foarte mică și dificil de măsurat folosind tehnici de măsurare de câmp.

Metoda de calcul de mai sus poate forma baza unei metodei de prezicere a performanței cantitative pentru o gamă mare de configurații ale sistemului, utilizând criteriul principal de proiectare – factorul de lumină naturală. Pentru o iluminare exterioară și o atenuare de flux date din figura 5 se poate estima fluxul luminos. Această informație împreună cu distribuția cunoscută a intensității conduce la ideea că, pentru calcule, un tub poate fi considerat ca fiind un corp de iluminat convențional.

5 Concluzii

Această lucrare este un raport interimar al unei cercetări în derulare. Rezultatele sugerează că sistemele de tuburi pasive utilizând tehnologia existentă prezintă un potențial ridicat ca un substitut al surselor electrice de lumină pentru un număr de aplicații. Intrarea pe piață a materialelor cu grad de reflexie regulată de 98% oferă posibilități mai mari de utilizare a tuburilor de lumină pasive cu lungimi mai mari. Lucrarea arată calea spre dezvoltarea unui sistem care va permite evaluarea cantitativă a sistemelor propuse și va oferi răspunsul la întrebare cum ar fi “Câte tuburi sunt necesare pentru a obține o distribuție particulară a factorului de lumină naturală într-un spațiu?” Metodele relatate în această lucrare, atunci când vor fi complet dezvoltate, vor fi încorporate sau utilizate alături de metodele existente de calcul a factorului de lumină naturală.