

### Една качествена задача от конвекция

Ако искате да проверите доколко учениците ви разбират механизма на конвекцията и смисъла на аномалията на водата, можете да им предложите следната качествена задача.

**Задача.** Велосипедна гума е пълна с вода с температура  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Във водата има малък електрически нагревател. При какво положение на гумата и при какво положение на нагревателя водата ще се нагрее най-бързо до  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

(Описаната ситуация е трудно реализуема, но затова – конкретна, поради което всеки може да си я представи. Би могло, разбира се, да говорим за пълен с вода тор и т.н., но това би изглеждало излишно абстрактно.)

**Решение.** Решението изисква съобразяване с няколко неща.

**1.** И гумата, и водата са лоши проводници на топлина, така че за бързо нагряване трябва да разчитаме не на топлоплопроводността, а на конвекцията (за лъчеизпускане и лъчепоглъщане е излишно да споменаваме).

**2.** Тъй като при конвекцията роля играе силата на тежестта, разположението на гумата трябва да създава максимално добри условия за проявлението ѝ. Ако гумата лежи в хоризонтална равнина, разлика във височините на различните нейни участъци и на съдържащата се в тях вода практически няма (радиусът на тръбата е малък спрямо радиуса на клелото). При това положение условията за конвекция са лоши – затоплената около нагревателя вода няма как да отиде и измести студената вода в диаметрално противоположния участък от клелото, тъй като те са на едно и също хоризонтално равнище. Ако обаче равнината, в която лежи гумата, е наклонена – конвекция вече може да се осъществи. Най-голяма разлика във височините и следователно – най-добри условия за конвекция ще има, ако гумата е във вертикална равнина.

**3.** Да уточним какво означава “положение на нагревателя”. Когато гумата е хоризонтална, всички нейни участъци са равноправни и положението на нагревателя е без значение. В т. 2. видяхме обаче, че решение трябва да се търси при вертикално положение на гумата, а в този случай вече има привилегирани положения на нагревателя – в най-долната и в най-горната нейни части. Ще разгледаме трите възможни случая:

- а) нагревателят е поставен във възможно най-ниско положение;
- б) нагревателят е поставен във възможно най-високо положение;
- в) нагревателят е поставен в произволно друго положение.

Да разгледаме първия случай, когато нагревателят е във възможно най-ниското положение. При включването му водата около него започва да се затопля, но поради аномалията плътността ѝ расте и тя остава на мястото си в най-долната част на гумата – конвекция няма и останалата вода се затопля само за сметка на слабата топлопроводност. Това продължава, докато температурата на водата около нагревателя достигне  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оттук нататък с продължаване на нагряването плътността ѝ вече намалява и, издигайки се по лявата и по дясната част на гумата, ще отива към горния край на гумата, т.е. започва конвекция. На мястото на издигнатата се вода постъпва хладка вода, и тя се нагрява до  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , започва да се издига и т.н. Следователно в този случай конвекция има, но тя започва с определено закъснение спрямо началото на нагряването.

Във втория случай, когато нагревателят е в най-високата точка, конвекцията започва веднага с включване на нагревателя: водата в най-високата точка става по-плътна и започва да се спуска надолу по двете части на гумата към най-ниската част. На нейно място постъпва вода с температура  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и тя се загрева, и тя се спуска надолу и т.н. Тази конвекция обаче спира, щом температурата на всичката вода достигне  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При по-нататъшно нагряване плътността на водата в горната част на гумата започва да намалява и тя си остава около нагревателя. Оттук нататък нагряването на останалата вода до 10 °С може да става само за сметка на топлопроводността. (При това, в зависимост от мощността на нагревателя, не е изключено водата около него да заври, докато температурата в долната част на гумата не е достигнала 10 °С.) Следователно в този случай водата ще се загрее до 10 °С по-бавно отколкото в предишния.

Остава да разгледаме третия случай. За конкретност нека предположим, че нагревателят е в средата на дясната половина на гумата (гледано срещу равнината, в която лежи). С включването му започва конвекция, като затоплената по-плътна вода се спуска надолу, а на нейно място отгоре идва студена вода, която се загрява, спуска и т.н. – докато температурата навсякъде достигне 4 °С. В този момент конвекцията спира, но веднага започва в обратна посока – затоплената над 4 °С вода започва да се издига, а на нейно място отдолу постъпва вода с температура 4 °С, нагрява се и тя, издига се и т.н.

Дори от тези разсъждения е ясно, че най-бързо желаните 10 °С ще бъдат достигнати в третия случай. Обърнете внимание обаче на една съществена разлика между първите два и третия случай! В първите два конвекцията (когато я има) се осъществява така, както при замръзването на водата в едно езеро<sup>1</sup>: слоевете вода с различни плътности си разменят местата, като, така да се каже, минават **един през друг**. В третия случай обаче ситуацията е различна: порция вода с една плътност **замества** (или измества) втора порция вода, имаща друга плътност, а на мястото на първата идва трета порция вода. С други думи в случая има **циркуляция** на водата вътре в гумата – нещо, което липсва в първите два случая<sup>2</sup>. При направеното предположение за положението на нагревателя в началото, т.е. преди достигане на температура 4 °, циркуляцията е по посока на движение на часовниковата стрелка, а след това – в обратна посока. Наличието на тази циркуляция способства допълнително за ускорено достигане на температура 10 °С от цялото количество вода.

Да погледнем нещата от малко по-друг ъгъл. В първите два от разгледаните три случая има симетрия: когато нагревателят е най-горе или най-долу, лявата и дясната половина на гумата са равноправни и като резултат – циркуляция няма. Когато обаче нарушим симетрията, поставяйки нагревателя (дори и малко) встрани, наблюдаваме съвсем ново явление – циркуляция на водата. Вероятно читателят е чувал за ролята на нарушените симетрии в съвременната теория на фундаменталните частици и техните взаимодействия. Тук току що се натъкнахме на пример, който илюстрира до какво може да доведе нарушаването на симетрията в областта на елементарната физика.

**Проблем.** Като имате предвид проведените разсъждения, помислете дали водата няма да се загрее най-бързо до 10 °С, ако използваме следната “тактика”. В началото поставяме гумата така, че нагревателят да е малко встрани от най-високата точка на гумата. Изчакваме температурата навсякъде да достигне 4 °С, след което завъртаме гумата, докато нагревателят да се окаже близо до най-ниската точка така, че да се запази посоката на началната циркуляция.

<sup>1</sup> Пример, описан многократно в прогимназиалните учебници за обясняване защо зиме при дъното на един водоем винаги има вода с температура 4 °С.

<sup>2</sup> Този случай също се описва в много учебници, когато се обяснява функционирането на водното отопление в ниски сгради, при които не са необходими циркуляционни помпи.