

ВІРТУАЛЬНИЙ ТРЕНАЖЕР ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ «ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ГАЗУ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ТИСКУ ДО ЙОГО ТЕПЛОЄМНОСТІ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ»

VIRTUAL SIMULATOR OF THE LABORATORY WORK "THE DETERMINATION OF THE RATIO OF THE HEAT CAPACITY OF A GAS AT CONSTANT PRESSURE TO ITS HEAT CAPACITY AT A CONSTANT VOLUME"

Метою статті є розробка віртуальної моделі лабораторної роботи «Визначення відношення теплоємності газу при постійному тиску до його теплоємності при постійному об'ємі». Програма призначена для використання як частини електронного методичного посібника і становить анімований інтерактивний тренажер. У статті наведені математичні моделі, що були використані під час написання алгоритмів, а також сценарії і дизайн, що забезпечують високий «ефект присутності» під час використання цього симулятора.

Новизна роботи полягає в тому, що можливість цієї моделі не обмежується імітацією лабораторного експерименту, а дозволяють варіювати параметри, які в навчальному лабораторному експерименті змінити вкрай складно або й неможливо. Зокрема, програма дозволяє вибрати досліджуваний газ, установлювати температуру газу, враховуючи при цьому виморожування ступенів свободи молекул цього газу за такої температури.

Програма може бути використана на етапі підготовки до лабораторної роботи, оскільки дозволяє ознайомитися з обладнанням і опанувати техніку вимірювань. Також можна скористатися нею на етапі захисту студентами лабораторних робіт, оскільки розширені можливості дозволяють запропонувати низку цікавих завдань. Тестування цієї навчальної програми студентами виявило очевидний інтерес учнів і суттєве скорочення часу, що витрачається на безпосереднє знайомство з лабораторним обладнанням. Програма, що була розроблена з метою методичної підтримки та супроводу фізичного практичного студентами стаціонарної та заочної форм навчання, в перспективі може бути використана студентами дистанційної форми навчання, що стає актуальним у період пандемії. Сценарії, алгоритми і математичні моделі, розроблені або задіяні в цій віртуальній лабораторній роботі, частково або повністю можуть бути використані під час створення віртуальних аналогів інших лабораторних робіт із фізики та інших природничих дисциплін.

Ключові слова: віртуальна модель лабораторної роботи, середовище навчання,

електронний спосіб представлення інформації, показник адиабати, число ступенів свободи.

The purpose of this study is to develop a virtual model of the laboratory work "The determination of the ratio of the heat capacity of a gas at constant pressure to its heat capacity at a constant volume". The program is intended for use as an element of an electronic teaching aid and is an animated interactive simulator. The article contains mathematical models, used in writing algorithms, and scenarios and design, that provide a high "effect of presence" of the trainee when using this simulator.

The newness of the work lies in the fact that the capabilities of this model are not limited to imitation of a laboratory experiment, but allows us to vary the parameters that are extremely difficult or impossible to change in an educational laboratory experiment. In particular, the program allows you to select the gas under study, to set the gas temperature and take into account the freezing of the degrees of freedom of the molecules of a given gas at a given temperature.

The program can be used at the stage of preparation for laboratory work, since it allows you to get acquainted with the equipment and to get familiar with the measurement technique. You can also use it at the stage of student examination of laboratory work, since advanced capabilities allow to set a number of interesting tasks.

When testing of this syllabus students revealed obvious interest and a significant reduction in the time spent on direct acquaintance with laboratory equipment was actualized. The program, developed with the aim of methodological support for the physical practice for students of stationary and corresponding course, in the future can be used by students of distance learning, which becomes obviously relevant during a pandemic. Scenarios, algorithms and mathematical models developed or used in this laboratory work virtual variant, in a part or as a whole, can be used to create virtual analogs of other laboratory works.

Key words: virtual model of the laboratory work, learning environment, electronic presentation of information, adiabatic exponent, degrees of freedom.

УДК 378.147.88: 004.588
DOI <https://doi.org/10.32843/2663-6085/2021/34-1.33>

Горбач В.М.,
канд. фіз.-мат. наук,
доцент кафедри загальної фізики
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Ляхтан О.А.,
інженер кафедри загальної фізики
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Гоков С.П.,
канд. фіз.-мат. наук,
завідувач лабораторії
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут»

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Як книгодрукування свого часу прийшло на зміну рукописному способу представлення, зберігання і передання інформації, так нині електронний спосіб представлення даних стрімко витісняє друкований. Молоде покоління, що становить контингент учнів, часто сприймає друкований текст як щось арха-

ічне і зовсім непривабливе. Тому розробка різних навчальних посібників, орієнтованих на електронний спосіб представлення інформації і таких, що використовують переваги, що їм надаються, є актуальним завданням розробників засобів навчання.

Мета статті. Під час проектування авторської версії електронного супроводу фізичного прак-

тикуму Lab4 на чільне місце було поставлено завдання створення максимально комфортного та привабливого для студента середовища навчання. Передбачалося, що в її межах має бути можливим підготуватися до виконання лабораторної роботи, ознайомитися з теоретичним матеріалом і експериментальним обладнанням, опанувати техніку виконання вимірювань і виконати необхідні розрахунки.

Виклад основного матеріалу. Поряд із традиційними для методичних посібників розділами, адаптованими для електронного способу подання інформації, в посібник Lab4 був включений віртуальний тренажер – інтерактивна комп'ютерна модель лабораторної роботи, що дозволяє в домашніх умовах ознайомитися з лабораторним обладнанням, відпрацювати техніку виконання лабораторного експерименту, а також імітувати експеримент в умовах, не зовсім досяжних для навчальної лабораторії.

У лабораторній роботі «Визначення відношення теплоємності газу при постійному тиску до його теплоємності при постійному об'ємі» використовується метод Клемана-Дезорма [1, с. 78–80]. Схема лабораторної установки наведена на рис. 1.

Посудина великої місткості за допомогою крана може сполучатися з атмосферою або насосом. Різниця між тиском повітря в посудині і атмосферним тиском вимірюється відкритим рідинним манометром, одне коліно якого сполучене з посудиною. Експеримент складається з чотирьох етапів. На першому етапі накачується повітря в посудину, процес якого вважаємо адіабатичним. Далі

нагріте в процесі адіабатичного стиснення повітря ізохорично охолоджується до кімнатної температури. Вимірюється різниця рівнів манометра h_1 , що встановилася. На короткий час відкривається кран, що з'єднує посудину з атмосферою, тиск у посудині зрівнюється з атмосферним – адіабатичне розширення. Охолоджене в процесі розширення повітря ізохорично нагрівається до кімнатної температури. Вимірюється різниця рівнів манометра h_2 , що встановилася. Коефіцієнт Пуассона розраховується за формулою $\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$.

Кількість ступенів свободи молекули повітря розраховується зі співвідношення $\gamma = \frac{i+2}{i}$.

Під час розроблення моделі-тренажера використовувалися нижченаведені математичні моделі.

На першому етапі (адіабатичний стиск) відомі початковий тиск P_0 , рівний атмосферному тиску H і початкова температура T_0 , рівна кімнатній температурі T_1 . Поточний тиск $P = H + \rho gh$, де h – поточні показання манометра. В міру накачування повітря в балон h збільшується. Після завершення процесу адіабатичного стиснення повітря в посудині матиме температуру $T_1 = T_0 \sqrt[\gamma]{\left(\frac{H + \rho gh}{H}\right)^{\gamma-1}}$ і тиск $P_1 = H + \rho gh_{\max}$.

Далі в процесі теплообміну з навколишнім середовищем повітря в посудині охолоджується до кімнатної температури T_1 . Миттєва температура повітря в посудині при цьому буде змінюватися за законом $T(t) = T_1 + (T_1 - T_0) \cdot e^{-\alpha t}$. З огляду

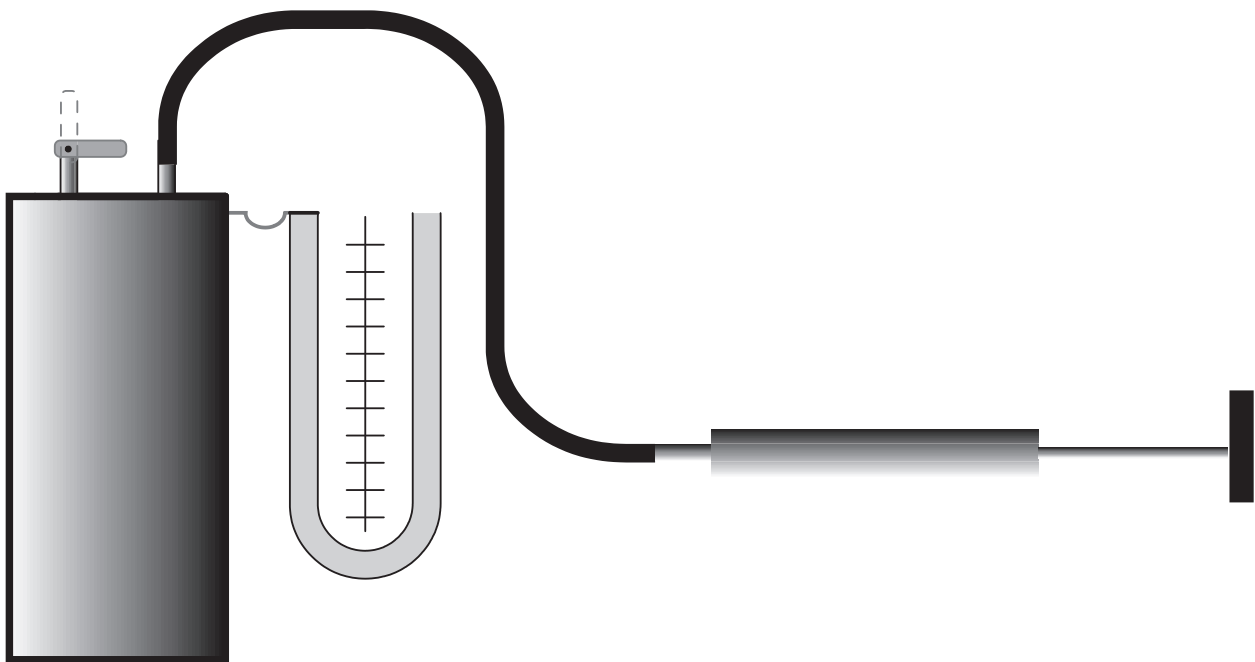


Рис. 1. Схема лабораторної установки

на те, що процес ізохоричний, знайдемо миттєве значення тиску в посудині $P(t) = T(t) \frac{P_1}{T_1}$ і відповідні йому показники манометра $h(t) = \frac{P(t) - H}{\rho g}$.

Процес закінчується встановленням кімнатної температури і тиску $P_2 = H + \rho g h_1 = T_2 \frac{P_1}{T_1}$.

У результаті короткочасного відкриття крана, який сполучає посудину з атмосферою, в посудині встановлюється тиск, рівний атмосферному P_3 . Температура в результаті адіабатичного розширення падає і визначається за формулою

$$T_3 = T_2 \sqrt[\gamma]{\left(\frac{H}{H + \rho g h_1}\right)^{\gamma-1}}$$

У результаті теплообміну повітря нагрівається до $T_4 = T_3$. Миттєва температура повітря в посудині при цьому буде змінюватися за законом $T(t) = T_3 + (T_2 - T_3) \cdot e^{-\alpha t}$. Тиск $P(t) = T(t) \frac{P_3}{T_3} = T(t) \frac{H}{T_3}$.

Показання манометра $h(t) = \frac{P(t) - H}{\rho g}$. Процес закінчується встановленням кімнатної температури і тиску $P_4 = H + \rho g h_2 = T_4 \frac{H}{T_3}$. Ці розрахунки були використані для побудови комп'ютерної моделі фази експерименту, що візуально спостерігається, тут – для моделювання поведінки рідини в манометрі.

Програма-тренажер пропонує провести експеримент не тільки з повітрям як газом, що досліджується, але пропонує цілий набір газів – одно-, дво-, трьо- і багатоатомних. Таким чином, пропонується можливість досліджувати зв'язок коефіцієнта Пуассона з кількістю ступенів свободи молекули газу. Крім того, в програму включена можливість змінювати температуру досліджуваного газу і, відповідно, спостерігати виморожування ступенів свободи молекул газу (рис 2).

Розрахунок залежності коефіцієнта Пуассона від будови молекули і температури газу для побудови відповідної розширеної комп'ютерної моделі експерименту проводився в такий спосіб [2, с. 152–173]:

Для одноатомних газів, молекули яких мають тільки поступальні ступені свободи, теплоємності при постійному тиску і об'ємі $C_v = C_{пост} = \frac{3}{2} R$, $C_p = \frac{3}{2} R + R = \frac{5}{2} R$. Відповідно, відношення теплоємностей $\gamma = \frac{5}{3} \approx 1.67$.

Для двохатомних і багатоатомних газів, молекули яких можуть мати обертальні і коливальні ступені свободи, повна теплоємність газу є сумою декількох членів:

$C_v = C_{пост} + C_{вр} + C_{кол}$, $C_p = C_{пост} + C_{вр} + C_{кол} + R$, кожен із яких пов'язаний із тепловим збудженням відповідно до поступального руху молекули, обертання її і коливань атомів молекули. $C_{пост}$, як і в

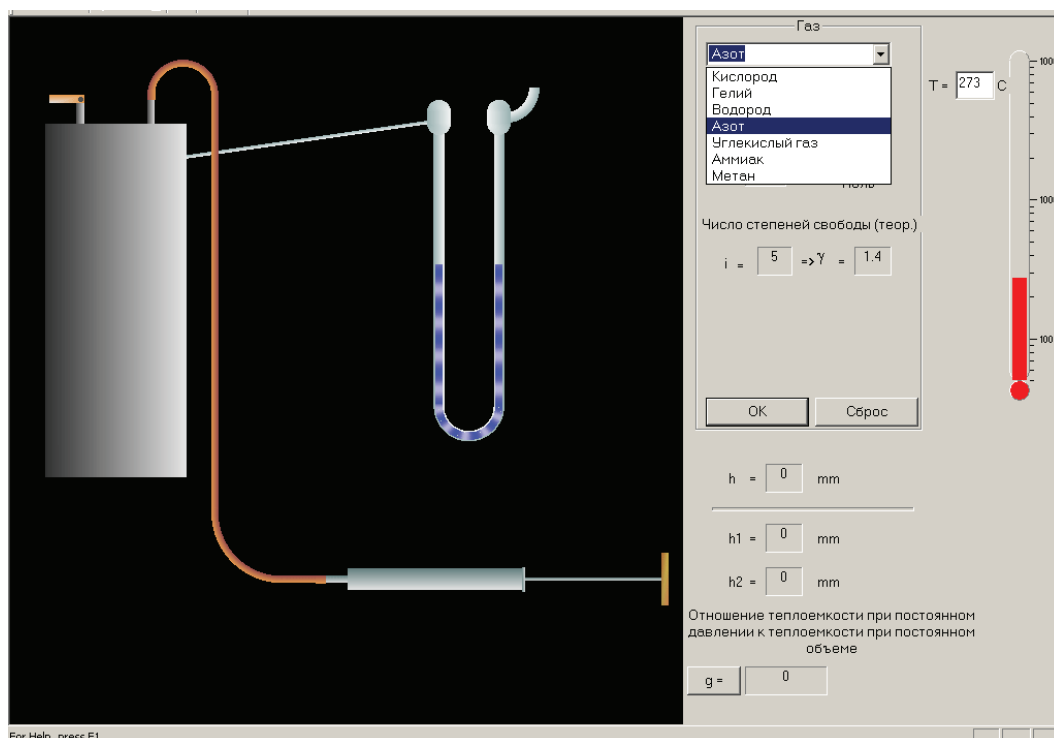


Рис. 2. Екран програми з відкритим меню вибору досліджуваного газу

разі одноатомної молекули, дорівнює $\frac{3}{2}R$.

Для двоатомних газів:

$$C_{вп} = T^2 \left(\frac{A \cdot B - D^2}{B^2} \right) + 2T \frac{D}{B},$$

Де

$$A = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{T_{вп} (2j+1) \cdot j \cdot (j+1) \cdot [j \cdot (j+1) T_{вп} - 2T]}{\exp \left[\frac{j \cdot (j+1) T_{вп}}{T} \right] \cdot T^4}$$

$$B = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{2j+1}{\exp \left[\frac{j \cdot (j+1) T_{вп}}{T} \right]}$$

$$D = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{T_{вп} (2j+1) \cdot j \cdot (j+1)}{T^2 \cdot \exp \left[\frac{j \cdot (j+1) T_{вп}}{T} \right]}$$

де j – оберталне квантове число,

$T_{вп} = \frac{\hbar^2}{2kl}$ – характеристична температура обертового руху.

$C_{кол}$:

$$C_{кол} = \left(\frac{T_{кол}}{T} \right)^2 \cdot \frac{\exp \left(\frac{T_{кол}}{T} \right)}{\left(\exp \left(\frac{T_{кол}}{T} \right) - 1 \right)^2}$$

і $T_{кол} = \hbar \omega$ – характеристична температура коливального руху.

Для багатоатомних газів завдяки великій величині моментів інерції багатоатомних молекул (i , відповідно, малості їх квантів обертання) їх обертання можна розглядати класично. Для багатоатомних лінійних молекул, які мають два обертальні ступеня свободи $C_{вп} = R$. Нелінійна багатоатомна молекула має три обертальних ступеня свободи. Отже $C_{вп} = \frac{5}{2}R$.

Коливальна частина теплоємності багатоатомного газу обчислювалася аналогічно до відповідних розрахунків для двоатомних газу. Різниця полягає в тому, що багатоатомна молекула має не одну, а кілька коливальних ступенів свободи. Тобто n -атомна (нелінійна) молекула має $r = 3n - 6$ коливальних ступенів свободи. Для лінійної n -атомної молекули $r = 3n - 5$. Таким чином, внесок коливальних ступенів свободи в теплоємність становить

$$C_{кол} = \sum_{k=1}^r \left(\frac{T_{колk}}{T} \right)^2 \cdot \frac{\exp \left(\frac{T_{колk}}{T} \right)}{\left(\exp \left(\frac{T_{колk}}{T} \right) - 1 \right)^2}$$

Відповідні математичні моделі й алгоритми були розроблені авторами і використані раніше в програмі-тренажері до лабораторної роботи «Визначення швидкості звуку методом інтерференції» [3, с. 196–204].

Сенсорно-моторна подібність реального експерименту і сценарій-підказка, що керує діями студента, були реалізовані в такий спосіб: елементи установки, які необхідно зміщувати, обертати або яким-небудь іншим способом з ними безпосередньо контактувати, підсвічуються яскравими кольорами, що миготять, привертаючи до себе увагу і змушуючи навести на них курсор. У разі попадання курсора в зону цього рухомого елемента установки миготіння відключається, а курсор приймає форму долоні. На кожному етапі виконання роботи доступним для маніпуляцій є тільки той рухливий елемент, із яким повинні бути зроблені дії саме в даний момент. Крім цього, на кожному етапі присутня підказка в рядку статусу.

Результати вимірювань фіксуються у відповідних полях. На панель управління також виводиться розрахункове значення коефіцієнта Пуассона і числа ступенів свободи молекули цього газу за такої температури (рис. 3).

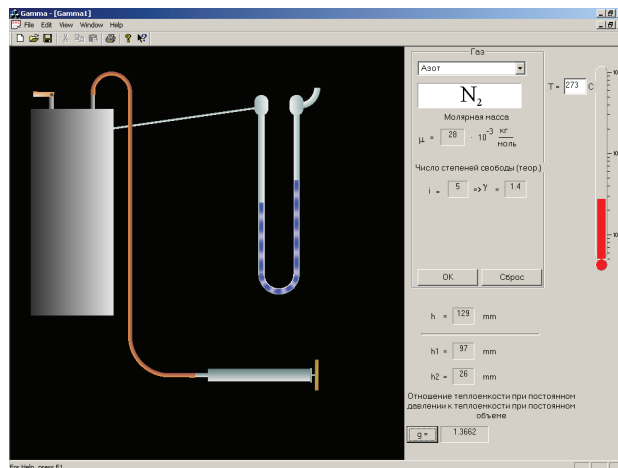


Рис. 3. Екран програми з розрахованим значенням коефіцієнта Пуассона

Незначне відхилення розрахункових значень від результатів віртуального експерименту пояснюється недостатньою тривалістю, «витримкою» процесів ізохоричного теплообміну, що фігурують у цьому експерименті і збігається для повітря зі складника похибки реального лабораторного експерименту, що визначається цією причиною.

Висновки. Тестування цієї навчальної програми студентами виявило очевидний інтерес учнів і суттєве скорочення часу, витраченого на безпосереднє ознайомлення з лабораторним обладнанням.

Програма, розроблена з метою методичної підтримки та супроводу фізичного практикуму студентами стаціонарної та заочної форм навчання, в перспективі може бути використана студентами дистанційної форми навчання. Сценарії,

алгоритми і математичні моделі, розроблені або задіяні в даній віртуальній лабораторній роботі, частково або повністю можуть бути задіяні під час створення віртуальних аналогів інших лабораторних робіт.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособ.: Для вузов : В 5 т. Москва : Наука, 1975. Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. 552 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика : Учеб. пособ.: Для вузов : В10 т. Москва : Физматлит, 2002. Т. 5 : Статистическая физика. Часть 1. 616 с.
3. Люхтан О.А., Горбач В.Н., Гоков С.П. Хвилі, інтерференція, швидкість звуку (Е – супровід фізпрактикуму). *Науковий часопис НПУ ім. М. П. Драгоманова*. Збірник наукових праць. Серія 5. Педагогічні науки. 2008. Вип. 12. С. 196–204.