

Научная статья  
УДК 53.03

## К ВОПРОСУ О ПОТЕНЦИАЛЕ СИЛ ДАВЛЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ В ПРОЦЕССЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Дмитрий Алексеевич Калашников<sup>1</sup>, Елизавета Александровна Радченко<sup>2</sup>, Нина Сергеевна Камалова<sup>3</sup>, Светлана Владимировна Внукова<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, Россия

<sup>1</sup> dima345687@gmail.com

<sup>2</sup> elizaveta.radchenko2005@mail.ru

<sup>3</sup> rc@icmail.ru

<sup>4</sup> vnukovasv@vgtu.ru

**Аннотация.** В статье описывается проведение с помощью электронных таблиц сравнительного исследования величины потенциала сил давления в различных средах в процессе адиабатического сжатия. Процесс моделируется в рамках теории механики жидкости и газа с учетом сжимаемости исследуемых сред. В результате проведенных исследований установлено существенное влияние плотности и сложности состава среды на потенциал сил давления при одинаковых внешних условиях.

**Ключевые слова:** идеальная среда, потенциал сил, баротропные процессы, вычислительный эксперимент, сравнительный анализ

Scientific article

## ON THE QUESTION OF THE POTENTIAL OF PRESSURE FORCES IN VARIOUS MEDIA IN THE PROCESS OF ADIABATIC COMPRESSION

Dmitry A. Kalashnikov<sup>1</sup>, Elizaveta A. Radchenko<sup>2</sup>, Nina S. Kamalova<sup>3</sup>, Svetlana V. Vnukova<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov, Voronezh, Russia

<sup>1</sup> dima345687@gmail.com

<sup>2</sup> elizaveta.radchenko2005@mail.ru

<sup>3</sup> rc@icmail.ru

<sup>4</sup> vnukovasv@vgtu.ru

**Abstract.** The article describes a comparative study of the magnitude of the potential of the pressure forces in various media in the process of adiabatic compression with the use of spreadsheets. The process is modeled within the framework of the theory of fluid mechanics taking into account the compressibility of the media under study. As a result of the conducted studies a significant influence of the density and complexity of the composition of the medium on the potential of pressure forces under the same external conditions has been established.

**Keywords:** ideal environment, force potential, barotropic processes, computational experiment, comparative analysis

Компьютерное моделирование в последнее время становится часто используемым инструментом проектирования систем различного назначения: для прогнозирования пожаров [1] и прироста биомассы в таких сложных экосистемах, как лесные массивы [2], при поиске решения задач модернизации функциональных узлов аппаратуры [3], для исследования влияния внешних факторов на свойства биокомпозитов [4] и т. д. При этом в настоящий момент актуальной является проблема формирования обоснованных фундаментальных формульных соотношений для описания тех или иных процессов.

Целью данной работы является сравнительный анализ зависимости потенциала сил давления в процессе быстрого сжатия в различных средах при одинаковых внешних условиях (температуре). Базовые соотношения модели сформулированы в баротропном приближении, исследования касаются быстротекущих процессов (без теплообмена) в диапазоне изменения давления от одной до нескольких атмосфер.

При баротропном протекании процессов в сжимаемых средах плотность ( $\rho$ ) является функцией только давления ( $p$ ). К таким процессам относится адиабатический процесс (без теплообмена). В рассматриваемой задаче для быстротекущего процесса можно использовать адиабатическое приближение, поэтому для идеальной сжимаемой среды можно записать выражения

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/\gamma}, \quad (1)$$

где  $p_0$ ,  $\rho_0$  – давление и плотность среды в начальный момент исследования соответственно;

$\gamma$  – показатель адиабаты, являющийся характеристикой среды и определяемый отношением ее теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

Согласно соотношениям Эйлера фактор силы в среде, действующей в выбранном направлении  $x$ , определяется как

$$f_x = \frac{dp}{\rho dx}, \quad (2)$$

следовательно, элементарный потенциал действия силы давления в выбранном направлении

$$d\Pi = f_x dx. \quad (3)$$

Для любого баротропного равновесного процесса с учетом выражений (1) и (2) получим соотношение для моделирования потенциала действия сил давления в зависимости от величины последнего для различных сред:

$$\Pi_B(p) = \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = -\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left( 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right). \quad (4)$$

Как видно из соотношения (4), основными характеристиками сред являются их плотность при температуре окружающей среды и показатель адиабаты, величины которых для вычислительного эксперимента определялись из справочной литературы и представлены в таблице.

#### Характеристики исследуемых сред [5]

Сжимаемая среда	Показатель адиабаты ( $\gamma$ )	Плотность ( $\rho_0$ ), кг/м <sup>3</sup> при 20 °С	Плотность ( $\rho_0$ ), кг/м <sup>3</sup> при 0 °С
Аргон	1,667	1,661	
Кислород	1,400	1,331	1,428
Воздух	1,400	1,205	1,293
Азот	1,400	1,165	–
Гелий	1,667	0,166	–
Водяной пар	1,333	0,804	–
Продукты сгорания	1,333	–	1,111

Результаты вычислительного эксперимента на основе соотношения (4) для различных сред (одноатомных – гелий и аргон; двухатомных – азот, кислород и воздух; многоатомных – водяной пар и продукты сгорания) представлены на рис. 1–3.

Анализ результатов вычислительного эксперимента выявил, что на функцию потенциала действия сил давления существенно влияет плотность среды. При этом влияние различий показателей адиабаты не так существенно. Например, плотность аргона при одинаковых внешних условиях и показателе адиабаты в десять раз превышает плотность гелия

(см. таблицу), при этом его потенциал действия сил давления существенно ниже (примерно в 10 раз), чем у гелия (рис. 1).

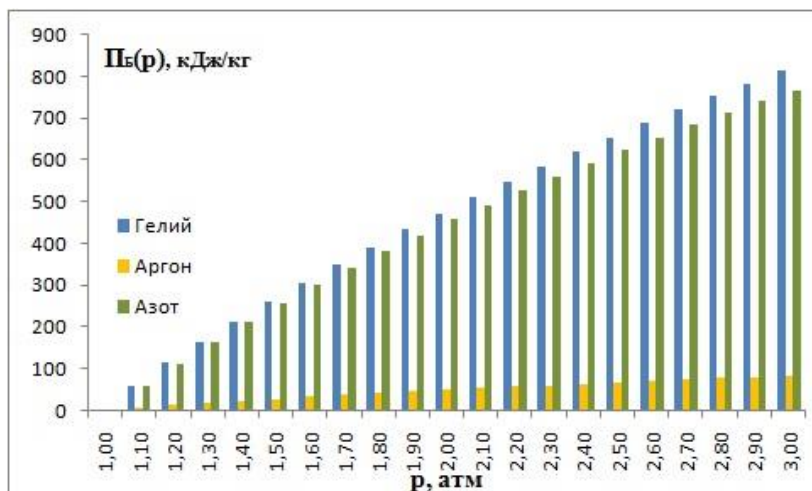


Рис. 1. Результаты вычислительного эксперимента для одноатомных газов (гелия, аргона) и азота

Величина потенциала сил давления воздуха, который является в основном смесью азота и кислорода, существенно меньше (примерно в 7 раз), чем у азота (см. рис. 1, рис. 2), но превышает  $P_B$  для кислорода в одинаковых условиях (давлении и температуре). Потенциал сил давления водяного пара примерно в 1,5 раза больше, чем у воздуха (разброс не превышает 2 %).

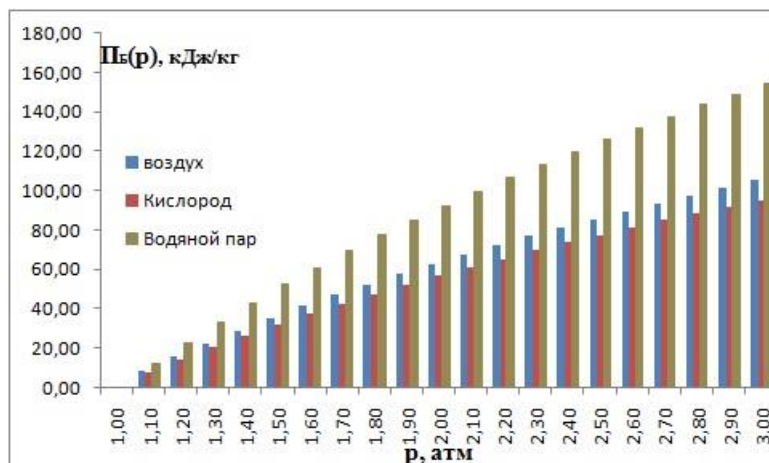


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента для воздуха, кислорода и водяного пара

Из рис. 3 видно, что потенциал сил давления воздуха при температуре 0 °С меньше соответствующего параметра у продуктов сгорания примерно на 15 %, но эта величина плавно спадает с увеличением давления.



Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента для воздуха, кислорода и продуктов сгорания

Таким образом, вычислительный эксперимент с использованием общедоступной справочной литературы и базовых соотношений, полученных в рамках известных теоретических концепций, позволяет провести сравнительный анализ характеристик процессов в различных средах и выявить неочевидные на первый взгляд закономерности. Кроме того, на этапе проектирования стендовых испытаний компьютерное моделирование позволяет оценить степень влияния на исследуемую величину как внешних факторов, так и характеристик, определяющих собственные свойства исследуемых сред.

#### *Список источников*

1. Евсиков, Ф. Д. Применение формализованного моделирования сложных систем к прогнозированию пожаров / Ф. Д. Евсиков, Н. С. Камалова, В. И. Лисицын // Развитие идей Г. Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопользованию : материалы международной научно-технической юбилейной конференции (Воронеж, 20–21 апреля 2017 года). – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2017. – С. 27–30.

2. Усольцев, В. А. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей, Д. В. Норицин // Леса России и хозяйство в них. – 2022. – № 1 (80). – С. 4–14.

3. Павлова, Е. С. Математическое моделирование технических объектов / Е. С. Павлова // Карельский научный журнал. – 2014. – № 4 (9). – С. 176–178.

4. Матвеев, Н. Н. Поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и биокomпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова,

Н. Ю. Евсикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2022. – 311 с.

5. Механика жидкости и газа : лабораторный практикум / Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, В. И. Лисицын, В. В. Саушкин. – Воронеж, 2016. – 62 с.