

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Расчет коэффициента сжимаемости газа  
для ультразвуковых расходомеров**

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 2 курса 2225 группы  
направления 03.04.02 «Физика» Института физики  
Гордиенко Александра Валерьевича

Научный руководитель  
д.ф.- м.н., профессор

В.В. Петров

Заведующий кафедрой  
д.ф.- м.н., профессор

В.М. Аникин

Саратов 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Природный газ является одним из основных энергоносителей в России. Страна производит более 500 миллиардов кубических метров природного газа в год. В рыночной экономике значительно возросли требования к системам контроля и учета газа, особенно к центру управления, регуляторам, компрессорным станциям и устройствам мониторинга газа.

В настоящее время наиболее перспективными устройствами для мониторинга и расчета расхода газа являются ультразвуковые расходомеры, основанные на определении времени распространения звукового сигнала в потоке газа вдоль и против движения потока.

Анализ основных характеристик и технических характеристик известных ультразвуковых расходомеров (Flowsick, Instromet, Q. Sonic, никогда-США и др.) показывает, что проблемы создания достаточно надежных расходомеров полностью не решены. В частности, необходимо выявить и устранить возможные причины ошибок измерения. Одним из факторов является низкая точность определения коэффициента сжимаемости газа.

**Предметами исследования**, рассматриваемыми в работе, стали 2 метода расчета коэффициента сжимаемости газа: NX-19 и GERG-91. Данные методы были выбраны исходя из того, что они позволяют рассчитать коэффициент сжимаемости газа без известного, точного химического состава газа.

**Цель и основные задачи работы.** Создание программного комплекса по расчету коэффициента сжимаемости газа.

**Задачи:** изучение научной литературы; построение программного комплекса по расчету коэффициента сжимаемости газа; сравнение точности используемых методов с литературными данными.

**Научная новизна работы.** При изучении программ по расчету коэффициента сжимаемости газа, находящихся в свободном доступе, был выявлен ряд серьезных недостатков:

1. Малое количество программ по расчету коэффициента сжимаемости.
2. Большинство продуктов являются узконаправленными и используются для конкретных составов и смесей.
3. Некоторые приложения являются коммерческими и имеют весьма высокую стоимость.
4. Программы очень громоздки и требуют много места.
5. Низкая скорость обработки результатов.
6. Для расчета требуется большое количество вводимых данных.

Анализ данных недостатков привел к идее создания своего собственного комплекса по расчету коэффициента сжимаемости газа. Комплекс создан по принципу модулей, что в будущем дает возможность увеличить его функционал с помощью присоединения новых дополнительных пакетов для расчета коэффициента другими методами.

Преимущества разработанной программы:

1. Высокая скорость решения задач
2. Простота конструкции кода программы

3. Высокая точность вычислений
4. Универсальность
5. Автоматический и ручной ввод информации, необходимый для решения задачи
6. Независимость количества оборудования от сложности задачи
7. Не требует информации о химическом составе газовой смеси

**Практическая значимость работы.** В данной работе с помощью использования методов NX-19 и GERG-91, реализованного в собственном программном комплексе, представлено решение фундаментальной проблемы в получении точных результатов коэффициента сжимаемости газа.

**Структура работы.** Выпускная квалификационная работа представлена на 53 страницах, включая 16 рисунков и 3 таблицы. Структура работы состоит из, введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованных источников, содержащего 44 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, определена цель работы.

**В разделе 1** рассмотрен принцип работы ультразвукового расходомера. Ультразвуковой расходомер газа или жидкости имеет принцип работы, основанный на прохождении ультразвуковой волны через поток. Такие устройства работают в широком диапазоне частот - от 20 кГц до 1000 МГц. Приборы измеряют скорость распространения звуковых колебаний в рабочей среде: это может быть как газ, так и жидкость (вода, сточные воды и т. д.).

Принцип их функционирования основан на эффекте Доплера. Это смещение частоты, которое происходит между волнами передатчика и приемника. Причиной этого являются препятствия, возникающие на пути ультразвука в окружающей среде. Это могут быть твердые частицы или пузырьки воздуха. Оба объекта могут отражать от себя звуковые волны, движущиеся в противоположном направлении.

Электроакустические преобразователи расхода расположены таким образом, что они практически не проникают в поток газа и не создают перепада давления в области измерительной линии. После того, как расходомер полностью изготовлен и собран, он подвергается "сухой" калибровке во время производственного процесса. Этот процесс выполняется в контролируемых условиях и позволяет точно настроить и проверить электронную часть расходомера. Этот процесс позволяет изготавливать расходомеры с высокой точностью измерения и воспроизводимостью. Длина корпуса расходомера стандартизирована в соответствии с длиной корпуса расходомера турбины, а также можно заказать корпуса нестандартной длины. Стандартные размеры включают расходомеры диаметром от 100 мм до 1400 мм. Функции калькулятора расхода включают сокращение потребления газа до нормальных условий, суммирование прошлого

объема газа, хранение, отображение и выдачу коммерческой информации в виде отчетов.

**В разделе 2** рассмотрены два метода расчета коэффициента сжимаемости газа.

В термодинамике коэффициент сжимаемости ( $Z$ ), также известный как степень сжатия или коэффициент отклонения газа, является поправочным фактором, описывающим отклонение поведения реального газа от поведения идеального газа. Это просто определяется как отношение объема реального газа к молярному объему идеального газа при той же температуре и давлении. Это полезное термодинамическое свойство для изменения закона идеального газа с учетом реального поведения газа. Как правило, отклонение от идеального поведения становится все более заметным, чем ближе температура к переходу, тем ниже температура или выше давление.

Коэффициент сжимаемости вычисляют по формуле

$$K = z/z_c \quad (1)$$

где  $Z$  и  $Z_c$  – коэффициент сжимаемости соответственно в рабочих и стандартных условиях. Условия работы характеризуются давлением и температурой, определяемыми измерениями при добыче, переработке и транспортировке природного газа. Давление  $P_c$  и температура  $T_c$  при стандартных условиях приведены в ГОСТ 30319.0.

Модифицированный метод NX 19 mod. для природных газов с плотностью  $\rho_s=0,668 - 0,70$  кг/м<sup>3</sup> в диапазоне температур 250-290 и давлениями до 3 МПа; отклонение расчета коэффициента сжимаемости настроек в этих диапазонах не превышает 0,11%; параметры этих полос характерны для измерения расхода и количества газа при его распространении среди потребителей.

Модифицированное уравнение состояния (США) GERG-91 mod, а также американские AGA8-92DC для природных газов с плотностью  $\rho_s = 0,668 - 0,70$  кг/м<sup>3</sup>, не содержат сероводорода, в диапазоне температур 250-330 К и давлении до 12 МПа; ошибка при расчете числа сжимаемости настроек в этих Диапазоны не более 0,11%; эти диапазоны настройки типичны при измерении расхода и количества транспортируемого газа по магистральным трубопроводам.

В соответствии с требованиями стандарта Германии расчет фактора сжимаемости по модифицированному методу NX 19 мод. основан на использовании уравнения следующего вида

$$Z = \frac{\left[1 + \frac{0,00132}{T_a^{3,25}}\right]^2}{\frac{B_1}{B_2} - B_2 + O_0} \cdot \frac{p_a}{10} \quad (2)$$

Коэффициент сжимаемости природного газа рассчитывается по формуле (1), в то время как фактор сжимаемости рассчитывается по формуле (2) в рабочих и стандартных условиях.

Согласно работам, подготовленным Европейской группой газовых исследований на основе экспериментальных данных, собранных в [12], и уравнения состояния вириального типа, имеет место соотношение:

$$z = 1 + B_m p_m + C_m p_m^2 \quad (3)$$

где  $B_m$  и  $C_m$  — коэффициенты. Коэффициент сжимаемости природного газа рассчитывается по формуле (1), в то время как фактор сжимаемости рассчитывается по формуле (3) в рабочих и стандартных условиях.

**В разделе 3** производилось рассмотрение среды разработки и языка программирования .

Microsoft Visual Studio – интегрированная среда разработки (IDE) от Microsoft. Он используется для разработки компьютерных программ, а также веб-сайтов, веб-приложений, веб-сервисов и мобильных приложений. Visual Studio использует платформы разработки программного обеспечения Microsoft, такие как Windows API, Windows Forms, Фонд презентаций Windows, Магазин Windows и Microsoft Silverlight. Он может создавать как свой собственный код, так и управляемый код.

*Достоинства:*

1. Официальное программное обеспечение. Поскольку и язык, и среда разработки были созданы в Microsoft, ничего более функционального нельзя найти. В некоторых случаях вы не можете обойтись без Visual Studio – например, при использовании технологий UWP и WPF.
2. Бесплатной "Community Edition" будет достаточно для обычного пользователя. Кроме того, можно подключать плагины (в отличие от старой версии Express).
3. Функциональность. В Visual Studio есть много высококачественных плагинов. С их помощью вы можете расширить функциональность приложения и подключить другие языки.
4. Поддержка. Сетевые платформы Visual Studio имеет широкие возможности для разработки приложений Windows, в том числе в .NET-сегменте.
5. Облачное хранилище. Войдите в сообщество Visual Studio и получите доступ к облачному хранилищу, в котором вы можете разместить файлы проекта.
6. Фирменный стиль. Технология отставания позволяет членам команды взаимодействовать с гибкой методологией разработки.

*Минусы:*

*Сложность:* Самостоятельно овладеть Visual Studio без опыта будет не просто – слишком много доступных функций, которыми нужно пользоваться.

Язык C#, разработанный Microsoft, является одним из самых популярных современных языков программирования. C# используется при работе с программами для ПК, при создании сложных веб-сервисов или мобильных приложений.

Как язык для нужд Microsoft, сетевая платформа постепенно стала очень популярной. Разработка языка началась в 1998 году, а первая версия была выпущена в 2001 году. Команду разработчиков возглавлял Андерс Хейлсберг, специалист, известный в профессиональных кругах. Новые версии C# выпускаются относительно часто, а текущие улучшения, исправления ошибок и расширения библиотек выполняются практически постоянно.

В результате язык является чрезвычайно гибким, мощным и универсальным. Он включает в себя практически все, от небольших веб-приложений до мощных программных систем, которые объединяют веб-структуры, настольные и мобильные приложения. Все это стало возможным благодаря удобному синтаксису, подобному C, строгой структурированности, большому количеству фреймворков и библиотек (их количество достигает нескольких сотен).

**В разделе 4** рассматриваются результаты работы и приводится сравнение с литературными данными.

В комплексе, разработанном корпорацией ООО «СпектрАкустика» и автором ВКР, был реализован модуль по расчету коэффициента сжимаемости газа. Программа представляет собой окно (рисунок 1) с расположенными на нем областями для ввода температуры, давления, плотности, молярных долей азота и диоксида углерода, а также двумя областями с результатами расчета коэффициента сжимаемости газа разными методами.

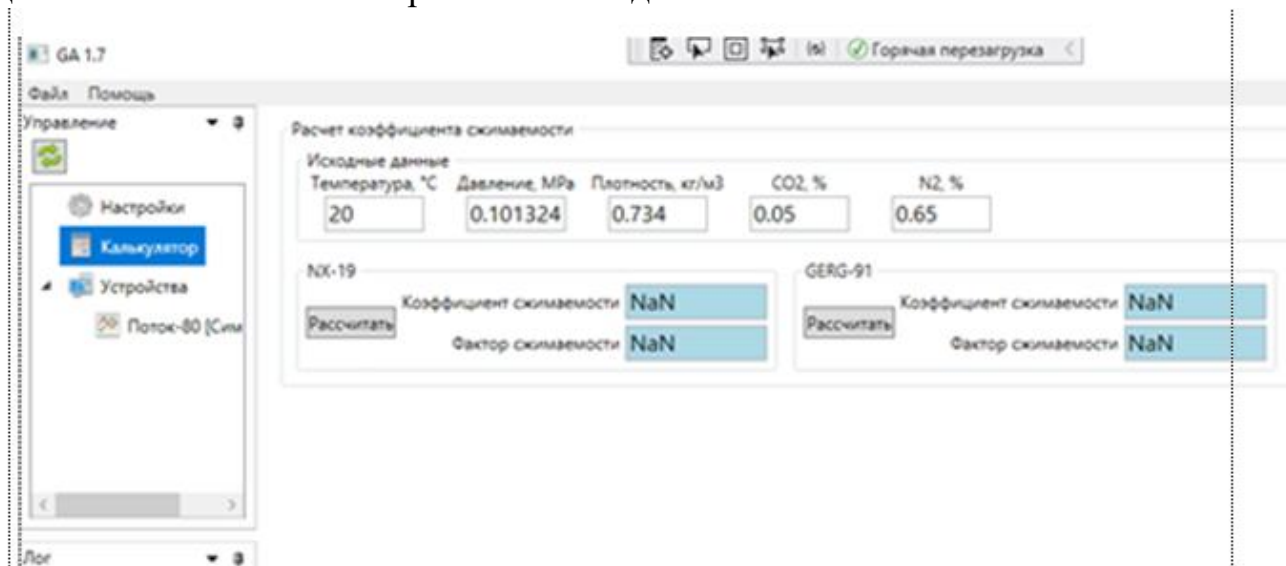


Рисунок 1 – Демонстрация внешнего вида разработанной программы.

При нажатии на кнопку «Расчитать» программа выполняет определённые действия, и на экране отображается результат расчета коэффициента сжимаемости газа.

Для проверки результатов были выбраны данные, представленные в ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости». Вначале проверка проводилась для модифицированного метода NX 19 мод (таблица 1).

**Таблица 1 – Результаты расчетов по методу NX-19 мод.**

N <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	P, МПа	T, °C	Коэффициент сжимаемости	
				эксп.	теор.
0,8858	0,0668	2,001	-3.15	0.9520	0,9520
0,8858	0,0668	2,494	6.85	0.9473	0,9473
0,8858	0,0668	0,900	16.85	0.9843	0,9844

Далее было сделано тестирование для модифицированного уравнения состояния GERG-91 мод (таблица 3).

**Таблица 2 – Результаты расчетов по методу GERG-91**

N <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	P, МПа	T, °C	Коэффициент сжимаемости	
				эксп.	теор.
0,8858	0,0668	2,001	-3.15	0.9520	0,9521
0,8858	0,0668	3,997	16.85	0.9262	0,9262
0,8858	0,0668	7,503	56.85	0.9243	0,9244

Из полученных данных видно, что результаты совпадают с теоретическими данными, представленными в ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости».

**В заключении** выпускной квалификационной работы сформулированы основные выводы результаты и выводы работы.

## **ВЫВОДЫ**

В результате выполнения работы был создан программный комплекс по расчету сжимаемости газа без известного компонентного состава.

Были проведены расчеты сжимаемости при разных заданных условиях.

Проведено сравнение полученных результатов с данными, представленными в ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости».

Подтверждены удобство и высокая точность определения коэффициента газа.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Намиот А.Ю. Фазовые равновесия легких углеводородов (сборник статей из иностранных журналов). - М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1958. - 162 с.
2. Берлин М.А. Гореченков В.Г., Волков Н.П. Переработка природных и нефтяных газов. - М.: Химия, 1981. - 472 с.
3. Kaufman T.G. Method for Phase Equilibrium Calculations Based on Generalized Benedict - Webb - Rubin Constants // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. - 1968. - V. 7. №1. - P. 115-120.
4. Lin M.S., Naphtali L.M. Prediction of vapor-liquid equilibria with the Benedict - Webb - Rubin equation of state // The American Institute of Chemical Engineers Journal. - 1963. - V. 9. №5. - P. 580-584.
5. Orye R.V. Prediction and Correlation of Phase Equilibria and Thermal Properties with the BWR Equation of State // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. - 1969. - V. 8. №4. - P. 579-588.
6. Starling K. E. Thermo data refined for LPG. Part 1. Equation of state and computer prediction // Hydrocarbon Processing. - 1971. - V. 50. №3. - P. 101.
7. Starling K. E. Fluid Thermodynamic Properties for Light Petroleum Systems // Gulf Publishing Company - 1973. - P 111.
8. Уейлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч. 1. Пер. с англ. - М.: Мир, 1989 - 304 с.
9. Edmister W.C., Vairogs J., Klekers A.J. A generalized B-W-R equation of state // The American Institute of Chemical Engineers Journal. - 1968. - V. 14. №3. - P. 479.
10. Opfell J.B., Sage B.H., Pitzer K.S. Application of Benedict Equation to Theorem of Corresponding States // Industrial and Engineering Chemistry. - 1956. - V. 48. №11. - P. 2069-2076.
11. Lee B.I., Kesler M.G. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states // The American Institute of Chemical Engineers Journal. - 1975. V. 21. №3. - P. 510-527.
12. Pitzer K. S., Curl R.F. Volumetric and Thermodynamic Properties of Fluids-Enthalpy, Free Energy, and Entropy // Industrial and Engineering Chemistry. - 1958. V. 50. - P. 265-274.