

Способ определения динамической вязкости газовых смесей

Аб. Г. Рзаев • С. Р. Расулов • Р. Ш. Асадова • З. Г. Гурбанов • Д. Р. Богданова

Предложенный метод разработан для использования в нефтегазовой промышленности, в частности, в теплообменных процессах насосно-компрессорной трубы нефтяной скважины, и предназначен для определения динамической вязкости газовых смесей, что является показателем силы внутреннего трения среды, которое противодействует любому динамическому изменению в движении флюида. Сущность метода заключается в определении динамической вязкости промысловых газовых смесей μ_g , что предусматривает измерение температуры (t) и давления (P) в устье эксплуатационной колонны и определение компонентного состава газовой смеси по результатам лабораторных анализов. Предложена формула, которая определяет значение газовой постоянной R для каждого компонента, а значение μ_g рассчитывают с помощью разработанного алгоритма и устройства реализации метода. Эффективность метода заключается в точности определения μ_g , простоте непосредственного измерения основных компонентов (p и t) при определении компонентного состава газовой смеси.

Динамическая вязкость; газовая смесь; газовая постоянная; молекулярная масса; температура; давление.

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена определению забойного давления нефтяных скважин, где повышение динамической вязкости приводит к повышению сопротивляемости и, следовательно, понижению скорости потока газовой смеси в затрубном пространстве (между подъемной трубой и эксплуатационной (обсадной) колонной) начиная от динамического уровня нефтяной жидкости до выкидной линии эксплуатационной колонны.

Это приводит к повышению давления газового столба и забойного давления нефтяных скважин, кроме того, к изменению динамической вязкости газовой смеси. Непосредственно влияет на коэффициент теплопередачи от восходящего потока пластового флюида в подъемной трубе и окружающей ее средой газовой смеси в затрубном пространстве. Чем больше динамическая вязкость газовой смеси, тем больше теплопередача.

Задачам определения «динамическая вязкость газовой смеси» посвящены ряд работ [Лут72, Ков10, Глу11]. В частности, в [Лут72] для определения динамической вязкости газа предложена формула Сатерланда, отражающая влияние температуры на динамическую вязкость газа:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где μ, μ_0 – динамические вязкости газа при текущей температуре T и T_0 ($T_0 = 273,15^\circ\text{K}$); C – постоянная Сатерланда.

Показано, что динамическая вязкость газов при увеличении температуры относительно динамической вязкости нефти увеличивается. Приведены значения газовой непостоянной R для углеводородных газов от метана по гексану.

Рзаев Аб. Г., Расулов С. Р., Асадова Р. Ш., Курбанов З. Г., Богданова Д. Р. Способ определения динамической вязкости газовых смесей // СИИТ. 2025. Т. 7, № 5(24). С. 25-30. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p25. EDN: SWCCUK.

Rzayev Ab. G., Rasulov S. R., Asadova R. Sh., Kurbanov Z. G., Bogdanova D. R. Method for determining the dynamic viscosity of gas mixtures // SIIT. 2025. Vol. 7, no. 5(24), pp. 25-30. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p25. EDN: SWCCUK. (In Russian).

Однако в данной работе определяется только динамическая вязкость чистых газов и не позволяет определить динамическую вязкость газовых смесей.

В работе [Ков10] для определения динамической вязкости газа предложено уравнение Старлинга–Эллингтона:

$$\mu_2 = k \exp \left(x \left(\frac{\rho_r}{1000} \right)^Y \right), \quad (2)$$

где k , x , Y – коэффициенты; ρ_r – плотность газа.

Кроме того, в указанной работе для определения углеводородных газов, начиная с пентана, значение динамических вязкостей μ_i , соответствующих фактическим величинам при стандартных условиях, используется формула:

$$\ln(\mu_i) = 0,0226 M_i \rho_i - 2,4472, \quad (3)$$

где M_i, ρ_i – молекулярная масса и плотность i -го компонента в жидком состоянии.

Однако в работе не показано, как определить числовые значения k, x, Y . Кроме того, экспериментальные значения динамической вязкости газов получены в стандартных условиях, и, следовательно, не учтено влияние температуры по формуле (2), температуры и давления по формуле (3) на динамическую вязкость газов.

Известен также метод определения динамической вязкости газа при давлениях, близких к атмосферному, где используется формула Чепмена–Экскаго [Гол59]:

$$\mu_{\text{атм}} = 2,6693 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_0}, \quad (4)$$

где M – молекулярная масса; T – температура, °K; σ – параметр потенциала Леннарда–Дженсона; Ω_0 – интеграл столкновений.

В данной работе формула Чепмена–Экскаго применена для расчета динамической вязкости полярных и неполярных газов.

Параметр потенциала Леннарда–Дженсона для полярных газов определяется по уравнению:

$$\sigma = \frac{1,09795 - 0,04075\omega}{\left(\frac{P_{\text{кр}}}{T_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (5)$$

где ω – фактор ацентричности; $P_{\text{кр}}$ – критическое давление; $T_{\text{кр}}$ – критическая температура.

Интеграл столкновений для неполярных газов определяется по выражению Нейфельда:

$$\Omega_0 = \left(\frac{1,16145}{T^{*0,14879}} \right) + \frac{0,52487}{\exp^{0,7732T^*}} + \frac{2,16178}{\exp^{2,43787T^*}}, \quad (6)$$

где $T^* = \frac{TK}{\varepsilon}$.

Соотношение ε/K определяется по выражению Готоха и Стьюарта:

$$\frac{\varepsilon}{K} = T_{\text{кр}}(0,7915 - 0,1693 \omega), \quad (7)$$

где ε – фактор потенциала Леннарда–Дженсона; $K = 1,3805 \times 10^{-16}$ – постоянная Больцмана.

Представлена графическая зависимость Ω от величины T^* . Приведен расчёт динамической вязкости при температуре 50°C.

Недостатком данной работы является то, что при условии изменения давления больше атмосферного, определение значений σ и Ω_0 будет носить вероятностный характер, и, следовательно, полученные результаты будут неточными, так как в приведенных выше формулах не учтено влияние изменения давления на значение динамической вязкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теория вязкости газов основывается на кинетической теории газов, что достаточно подробно описано в работах [Гол59, Гур84]. Однако при повышенных давлениях методы,

основанные на теории вязкости, не дают удовлетворительной точности значений коэффициента динамической вязкости. Следовательно, разработка метода, позволяющего в автоматическом режиме более точно и надежно определить значение динамической вязкости газовой смеси, является актуальной задачей, чему и посвящена данная статья.

Данное исследование выполнено в русле работ авторов [Pза24, Ras25a, Ras25b, Kel25].

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

С учетом вышеизложенного, нами предложен более точный и надежный метод определения динамической вязкости газовых смесей μ_r , в котором измеряются давление P и температура t в устье эксплуатационной колонны, по результатам лабораторных анализов определяют компонентный состав газовой смеси, газовую постоянную для каждого компонента, а значения μ_r и газовой постоянной смеси рассчитывают по следующему алгоритму:

$$\mu_r = \mu_{rc} + \left(\frac{\rho_r - 0,6}{\rho_{rx}} \right)^2, \quad (8)$$

где $\rho_r = \frac{P}{ZRT}$;

$$R = 42,3 \exp\left(-\frac{M-16}{M_x}\right) + 96 = 42,3 \exp\left(-\frac{M-16}{18,5}\right) + 96;$$

$$\rho_{rx} = 0,0708 + 0,0186 \exp\left[-\left(\frac{\frac{P}{t} - 0,79}{0,4}\right)\right]; \quad \mu_{rx} = 22,72 + 1,659(P/t)^2,$$

где μ_r, μ_{rc} — соответственно текущее значение динамической вязкости газовой смеси и ее значение в стандартных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$, $p = 0,1$ МПа), мкПа.с; P, t — текущее значение давления (МПа) и температуры ($^\circ\text{C}$) газовой смеси; ρ_r — плотность газовой смеси кг/м^3 ; μ_{rx} — характеристическое значение μ_r ; ρ_{rx} — характеристическое значение ρ_r ; R — газовая постоянная, Дж/(кг \times °К); T — температура, °К; Z — коэффициент сжимаемости, определяемый по критическим давлениям и температуре газа; M — молекулярная масса газовой смеси; M_x — характеристическое значение M .

Данный метод позволяет автоматически измерять параметры давления, температуры и динамический уровень, с помощью которых рассчитывают значение динамической вязкости газовых смесей. Метод прост и не требует сложных устройств для его реализации. Характеризуется высокой точностью и быстротой расчета, что дает оперативно определять значение динамической вязкости газовых смесей.

Реализация метода осуществляется с помощью известных устройств, расположенных в устье эксплуатационной колонны и проиллюстрированных на рисунке.

Здесь 1, 3, 5 — соответственно датчики давления, уровня и температуры, расположенные на устье эксплуатационной колонны; 2, 4, 6 — соответственно преобразователи сигналов, полученных от датчиков 1, 3 и 5; 7 — насосно-компрессорная труба; 8 — эксплуатационная колонна; 9 — полированный шток; 10 — блок расчета и индикации.

Реализация метода происходит следующим образом: лабораторным путем определяют газовую постоянную смеси. Измеряют давление и температуру в устье эксплуатационной колонны датчиками давления 1 и температуры 3, выходы которых соединены через преобразователи 2 и 6 с блоком расчета и индикации 10. Динамический уровень в межтрубном пространстве измеряют датчиком 3 и преобразователем 4. На основе измеренных значений в блоке расчета и индикации по предложенному алгоритму определяют текущее значение динамической вязкости газовой смеси.

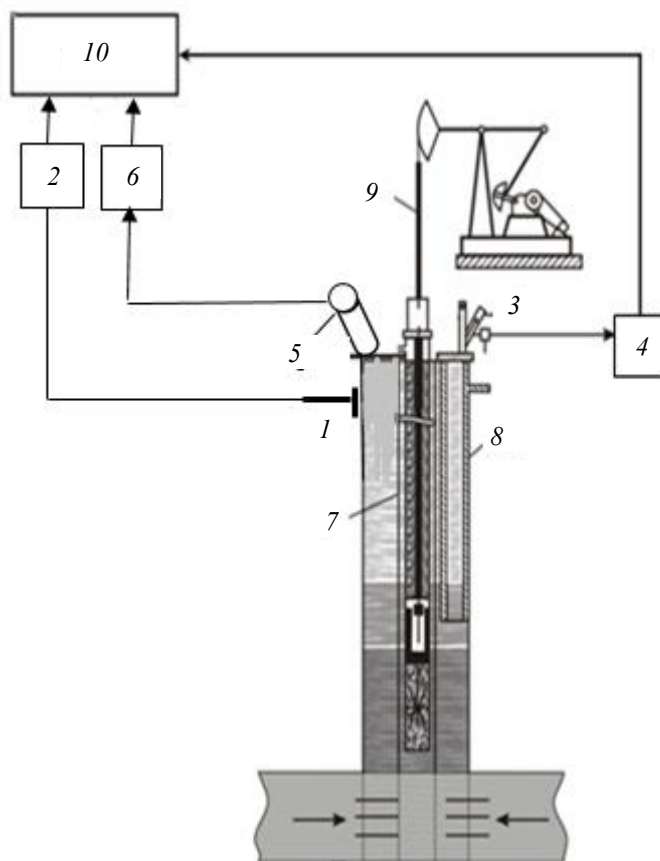


Рис. Устройство для реализации предложенного способа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод, использование которого способствует определению динамической вязкости газовых смесей, что предусматривает измерение температуры и давления в устье эксплуатационной колонны, определение компонентного состава газовой смеси по результатам лабораторных анализов. Предлагается формула, которая определяет значение газовой постоянной для каждого компонента. Разработано устройство для реализации предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- | | | |
|----------|---|---|
| [Kel25] | Kelbaliyev G. I., Rasulov S. R., et al. Study of modern methods of removing deposits formed in oil equipment and pipes // СИИТ. 2025. Т. 7, № 4(23). С. 29-37. EDN YLNATE . | Kelbaliyev G. I., Rasulov S. R., et al. "Study of modern methods of removing deposits formed in oil equipment and pipes" // СИИТ. 2025. V. 7, no. 4(23). С. 29-37. EDN YLNATE . |
| [Ras25a] | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., et al. Formation of structures in media containing oil // СИИТ. 2025. Т. 7, № 2(21). С. 103-108. EDN UFZDNC . | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., et al. "Formation of structures in media containing oil" // СИИТ. 2025. V. 7, no. 2(21), pp. 103-108. EDN UFZDNC . |
| [Ras25b] | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., et al. A model of the dependence of the settling velocity of water droplets on the turbulent diffusion coefficient in oil // СИИТ. 2025. Т. 7, № 3(22). С. 118-123. EDN RXZXBТ . | Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., et al. "A model of the dependence of the settling velocity of water droplets on the turbulent diffusion coefficient in oil" // СИИТ. 2025. V. 7, no. 3(22), pp. 118-123. EDN RXZXBТ . |
| [Глу11] | Глумов Д. Н., Стрекалов А. В. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С. 194-209. EDN: OOVKWX . | Glumov D. N., Strekalov A. V. "Method for calculating the dynamic viscosity of gases in a wide range of pressures" // Electronic Scient. J. "Oil and Gas Business". 2011. No. 1, pp. 194-209. EDN: OOVKWX . (In Russian). |
| [Гол59] | Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей: Справочное руководство. М.: Физматгиз, 1959. 375 с. | Golubev I. F. Viscosity of Gases and Gas Mixtures: Reference guide. Moscow: Fizmatgiz, 1959. (In Russian). |

- [Гур84] Гуревич Г. Р., Брусиловский А. И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. М.: Недра, 1984. 264 с. Gurevich G. R., Brusilovsky A. I. Reference manual for calculating the phase state and properties of gas condensate mixtures. Moscow: Nedra, 1984. (In Russian).
- [Ков10] Ковалев К. А., Амирханов И. М. Косвенные методы определения вязкости пластовых жидкостей Татарстана // Нефтяное хозяйство. 2010. № 4. С. 78-82. EDN: [MQQCVR](#). Kovalev K. A., Amirkhanov I. M. Indirect methods for determining the viscosity of reservoir liquids in Tatarstan // Oil Industry. 2010. No. 4, pp. 78–82. (In Russian). EDN: [MQQCVR](#).
- [Лут72] Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды к транспорту. М.: Недра, 1972. 324 с. Lutoshkin G. S. Collection and Preparation of Oil, Gas and Water for Transport. Moscow: Nedra, 1972. (In Russian).
- [Рза24] Рзаев А. Г., Расулов С. Р., Асадова Р. Ш. и др. Определение коэффициента мертвого пространства в цилиндре штангового глубинного насоса // СИИТ. 2024. Т. 6, № 4(19). С. 32-37. EDN [FWWTRS](#). Rzaev A. G., Rasulov S. R., Asadova R. Sh. et al. "Determination of the dead space coefficient in the cylinder of a sucker rod pump" // SIIT. 2024. Vol. 6, no. 4(19), pp. 32-37. EDN [FWWTRS](#). (In Russian).

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

РЗАЕВ Аббас Гейдар оглы

Институт систем управления Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Респ. Азербайджан. abbas_r@mail.ru ORCID: [0009-0003-3074-4887](#)
Проф., гл. науч. сотр. лаборатории интеллектуальных систем диагностики и управления нефтегазовыми объектами. Дипл. инж.-системотехник (Азерб. ин-т нефти и химии, 1968). Д-р техн. наук по процессам и аппаратам хим. технологии (Ин-т теор. проблем хим. технологии, Баку, 1994). Иссл. в обл. проектирования и управления процессами нефтепереработки.

РАСУЛОВ Сакит Рауф оглы

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Респ. Азербайджан. rasulovsakit@gmail.com ORCID: [0000-0002-1548-3143](#)
Зав. каф. промышленной безопасности и охраны труда. Дипл. химик-технолог (Азерб. ин-т нефти и химии, 1976). Д-р техн. наук по разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (Азерб. гос. ун-т нефти и промышленности, 2011). Иссл. в обл. компл. безопасности техн. процессов и окружающей среды в промышленности.

АСАДОВА Рена Шариф кызы

Институт систем управления Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Респ. Азербайджан. Renaasadova2007@rambler.ru ORCID: [0009-0000-6163-8727](#)
Зав. отд. науч.-техн. информации и патентных исследований. Дипл. инж.-системотехник (Азерб. ин-т нефти и химии, 1985). Канд. техн. наук (PhD) по контрольно-измерительным системам и приборам (Там же, 2001). Исслед. в обл. э/магнитн. индуктивн. преобразователей.

ГУРБАНОВ Зафар Газанфар оглы

Азербайджанский государственный сельскохозяйственный университет, Респ. Азербайджан. zafer_adna@mail.ru ORCID: [0000-0002-0805-9862](#)
Ректор. Канд. техн. наук (PhD) (2007), доц. Иссл. в обл. оптимального управления многостадийными технологическими процессами нефтепереработки.

БОГДАНОВА Диана Радиковна

Уфимский университет науки и технологий, Россия. dianochka7bog@mail.ru ORCID: [0000-0001-9887-2875](#)
Доц. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. математик-экономист (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2005). Канд. техн. наук по упр. в соц. экон. системах (Там же, 2008). Иссл. в обл. искусственного интеллекта.

RZAYEV Abbas Heydar

Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Republic of Azerbaijan. abbas_r@mail.ru ORCID: [0009-0003-3074-4887](#)
Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Intelligent Systems for Diagnostics and Management of Oil and Gas Facilities. Certified systems engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1968). Doctor of Technical Sciences in Processes and Apparatus of Chemical Technology (Institute of Theoretical Problems of Chemical Technology, Baku, 1994).

RASULOV Sakit Rauf

Azerbaijan State Oil and Industry University, Republic of Azerbaijan. rasulovsakit@gmail.com ORCID: [0000-0002-1548-3143](#)
Head of the Department of Industrial Safety and Labor Protection. Certified chemical engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1976). Doctor of Technical Sciences in Development and Operation of Oil and Gas Fields (Azerbaijan State University of Oil and Industry, 2011). Research in the field of integrated safety of technical processes and the environment in industry.

ASADOVA Rena Sharif

Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Republic of Azerbaijan. Renaasadova2007@rambler.ru ORCID: [0009-0000-6163-8727](#)
Head of the Department of Scientific and Technical Information and Patent Research. Certified systems engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1985). Cand. of Technical Sciences (PhD) in control and measuring systems and devices (ibid., 2001). Research in the field of electromagnetic inductive converters.

GURBANOV Zafar Gazanfar

Azerbaijan State Agricultural University, Republic of Azerbaijan. zafer_adna@mail.ru ORCID: [0000-0002-0805-9862](#)
Rector. Candidate of Technical Sciences (PhD) (2007), Assoc. Prof. Research in the field of optimal control of multi-stage technological processes of oil refining.

BOGDANOVA Diana Radikovna

Ufa University of Science and Technology, Russia. dianochka7bog@mail.ru ORCID: [0000-0001-9887-2875](#)
Assoc. Prof., Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Diploma in Mathematics and Economics (2005). Candidate of Technical Sciences in Management in Social and Economic Systems (2008). Research in the field of Artificial Intelligence.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Способ определения динамической вязкости газовых смесей.

Авторы: Рзаев Аб. Г., Расулов С. Р., Асадова Р. Ш., Курбанов З. Г., Богданова Д. Р.

Аннотация: Предложенный метод разработан для использования в нефтегазовой промышленности, в частности, в теплообменных процессах насосно-компрессорной трубы нефтяной скважины, и предназначен для определения динамической вязкости газовых смесей, что является показателем силы внутреннего трения среды, которое противодействует любому динамическому изменению в движении флюида. Сущность метода заключается в определении динамической вязкости промысловых газовых смесей μ_g , что предусматривает измерение температуры (t) и давления (P) в устье эксплуатационной колонны и определение компонентного состава газовой смеси по результатам лабораторных анализов. Предложена формула, которая определяет значение газовой постоянной R для каждого компонента, а значение μ_g рассчитывают с помощью разработанного алгоритма и устройства реализации метода. Эффективность метода заключается в точности определения μ_g , простоте непосредственного измерения основных компонентов (p и t) при определении компонентного состава газовой смеси.

Ключевые слова: Динамическая вязкость; газовая смесь; газовая постоянная; молекулярная масса; температура; давление.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Title: Method for determining the dynamic viscosity of gas mixtures.

Authors: Rzayev Ab. G., Rasulov S. R., Asadova R. Sh., Kurbanov Z. G., Bogdanova D. R.

Abstract: The proposed method is designed for use in the oil and gas industry for heat exchange processes of oil well tubing and is intended to determine the dynamic viscosity of gas mixtures, which is an indicator of the internal friction force of the medium, which counteracts any dynamic change in the fluid motion. The essence of the method lies in determining the dynamic viscosity of field gas mixtures μ_g , which involves measuring the temperature (t) and pressure (P) at the mouth of the production column, determining the component composition of the gas mixture based on the results of laboratory analysis. A formula is proposed that determines the value of the gas constant R for each component, and the value of μ_g is calculated using the developed algorithm and device for implementing the method. The effectiveness of the method lies in the accuracy of determining μ_g , the simplicity of direct measurement of the main components (p and t) when determining the component composition of the gas mixture.

Key words: Dynamic viscosity; gas mixture; gas constant; molecular mass; temperature; pressure.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 15 July 2025.