

Казанский Федеральный Университет.

Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов

Kazan Federal University.

Department of oil & gas technology and carbon materials

**Расчетные методы определения физико-химических свойств и состава газа
и газоконденсата**

**Calculation methods for determining the physico-chemical properties
and composition of gas and gas condensate.**

Рахматов Сардор Шавкат угли¹, Кемалов Руслан Алимович²,

Rakhmatov Sardor Shavkat ugli, Kemalov Ruslan Alimovich

¹магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов

²кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов, член экспертного совета Российского Газового общества (РГО), и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная РГО, профессор РАЕ

E-mail:Rakhmatov2602@mail.ru, kemalov@mail.ru

Аннотация

Цель данной работы: рассчитать физико-химические свойства газоконденсатных систем по учебному пособию учебное пособие основы расчетов и проектирования “Предпроектные исследования газоконденсатных систем”.

Задачи данной работы: Плотность смеси газов, Молекулярная масса смеси, Вязкость, Влажность газов, Пределы воспламенения, Теплота сгорания газов, Скорость распространения пламени, температуру горения, зависимость теоретической вязкости от температуры, теплоемкость, коэффициентом Джоуля-Томсона, плотность жидкого продукта, коэффициенты уравнения, поверхностное натяжение жидкости, температура застывания.

Abstract

Density of a mixture of gases, Molecular mass of a mixture, Viscosity, Humidity of gases, Ignition limits, Calorific value of gases, Flame propagation speed, Burning temperature, Theoretical viscosity versus temperature, Heat capacity, Joule-Thomson coefficient, Density of a liquid product, Equation coefficients, Surface tension of a

liquid , Pour point Abstract: The purpose of this work: calculate the physical and chemical properties of gas condensate systems according to the textbook: Tutorial Fundamentals of Calculations and Design “Pre-project studies of gas condensate systems. Objectives of this paper: Characteristic boiling points of petroleum fractions, Characteristic factor, Density, Molecular weight, Saturated vapor pressure, Critical parameters and reduced constants, Compressibility factor, Fugacity, Viscosity, Thermal properties, Mass, volume and molar composition.

Ключевые слова: плотность, молекулярная масса, вязкость, влажность газов, теплота, температура застывания

Keywords: density, molecular weight, viscosity, humidity of gases, heat, pour point

Введение (introduction)

Газовый конденсат представляет собой жидкость, которая конденсируется из газа при понижении давления (ниже *давления начала конденсации*), что обратно нормальному процессу конденсации (обычная конденсация происходит при повышении давления), поэтому газовый конденсат называется также ретроградной жидкостью. Такой процесс ретроградной конденсации возможен только в смесях, содержащих не менее двух химических компонентов (лёгкий и тяжёлый) и только при давлениях и температурах, близких к термодинамической критической точке смеси.

Конденсат состоит прежде всего из тяжёлых и средних компонентов, которые играют роль конденсатообразующих фракций, а также содержит и лёгкие компоненты, которые растворяются в жидкости. В простейшей двухкомпонентной смеси конденсатообразующим является более тяжёлый компонент. Для конденсатов природного газа к конденсатообразующим компонентам относятся бензиновые фракции (C_{5+} , что означает парафины C_5H_{12} и более тяжёлые) и керосиновые (C_{8+}). Этан, метан и лёгкие не углеводородные компоненты также входят в состав конденсата, как растворённые вещества. Для большинства газовых конденсатов содержание бензиновых фракций составляет 70-85 %.

Свойства конденсата близки к очень лёгкой нефти. Конденсат, который, образовавшись из газа, продолжает находиться в контакте с газовой фазой,

называется нестабильным (или сырым). Он содержит в своём составе лёгкие компоненты. Если их извлечь, то получится стабильный конденсат. Стабильный конденсат состоит только из конденсатообразующих компонентов.

Конденсатом называют также смесь конденсатообразующих химических компонентов. В этом смысле конденсат может входить в состав и газовой фазы. Фраза «газ содержит конденсат» означает наличие конденсатообразующих компонентов в газовой фазе. При большом содержании конденсата газ называется сырым, при их отсутствии - сухим.

За рубежом масштабное изучение газоконденсатных залежей началось в 30-х годах 20-го века. До этого времени термин «газовый конденсат» был известен лишь узкому кругу ведущих специалистов нефтяной и газовой промышленности. По мере открытия и освоения газовых месторождений и развития глубокого бурения специалисты столкнулись с месторождениями, очень богатыми газом, причем в отличие от чисто газовых месторождений продукция содержала значительный процент тяжелых углеводородов. Таким образом были обнаружены месторождения особого типа, названные впоследствии газоконденсатными. Вначале в США эти месторождения эксплуатировались как чисто газовые с использованием газа в качестве топлива и рабочего агента при вторичной эксплуатации. В тех случаях, когда месторождение находилось вдали от газовых месторождений и промышленных центров (т.е. газ не имел промышленного применения), такие месторождения консервировали. В других случаях, когда газовые фонтаны сопровождалась конденсацией некоторого количества «моторного топлива» в сепараторах, а газ не мог иметь промышленного применения, предприниматели мирились с выпуском большого количества газа в атмосферу в погоне за конденсатом - готовым моторным топливом.

Выпадения конденсата в сепараторах при снижении давления находило различное толкование. Одни объясняли это резким снижением температуры. Другие считали, что газоконденсатные месторождения представляют собой слабо насыщенные нефтяные месторождения особого сорта «белой» (лёгкой) нефти. При эксплуатации подобных месторождений в отдельных случаях

приходилось сталкиваться с такими непонятными явлениями, как увеличение содержания бензина в газе при повышении давления и уменьшение - при снижении давления. Таким же аномальным казалось и обогащение газовой фазы более тяжелыми углеводородами. Подобного рода явления побудили исследователей заняться изучением поведения газовых смесей в условиях пласта. В 1936 году впервые были опубликованы работы об изучении явлений ретроградной конденсации в газоконденсатных пластах. По результатам этих работ начали создаваться технологии разработки и эксплуатации газоконденсатных месторождений с целью более рационального использования природных ресурсов, поскольку стало очевидным, что эксплуатация газоконденсатных месторождений как чисто газовых приводит к безвозвратной потере значительного количества весьма ценного топлива. В 1936 году В. Воугеном для увеличения извлечения конденсата при разработке газоконденсатных залежей был предложен сайклинг-процесс, суть которого заключалась в обратной закачке в пласт осушенного газа. Эта технология нашла широкое применение в США и Канаде, а затем и во всем мире. Она успешно применяется и до настоящего времени.

Несмотря на то, что особенности разработки и эксплуатации газоконденсатных месторождений США широко освещались в американской специальной литературе, в нашей стране этой проблеме не уделялось должного внимания вплоть до 40-х годов. Первой в нашей стране книгой, освещающей опыт США по эксплуатации газоконденсатных месторождений, была монография М.Х. Шахназарова «Теория и практика эксплуатации газоконденсатных месторождений», изданная в Баку в 1944 году [1]. Она познакомила инженерно - технических работников нефтегазовой

Introduction

Gas condensate is a liquid that condenses from a gas when the pressure drops (below the pressure at which condensation starts), which is the reverse of the normal condensation process (normal condensation occurs when the pressure rises), so gas condensate is also called a retrograde liquid. Such a process of retrograde condensation is possible only in mixtures containing at least two chemical components (light and

heavy) and only at pressures and temperatures close to the thermodynamic critical point of the mixture. The condensate consists primarily of heavy and medium components, which play the role of condensate-forming fractions, and also contains light components that dissolve in the liquid. In the simplest two-component mixture, the heavier component is the condensate-forming one. For natural gas condensates, condensate-forming components include gasoline fractions (C₅+, which means C₅H₁₂ and heavier paraffins) and kerosene (C₈+). Ethane, methane and light non-hydrocarbon components are also included in the condensate as dissolved substances. For most gas condensates, the content of gasoline fractions is 70-85%.

The properties of the condensate are close to very light oil. The condensate, which, having formed from the gas, continues to be in contact with the gas phase, is called unstable (or wet). It contains light ingredients. If you remove them, you get a stable condensate. Stable condensate consists only of condensate-forming components. Condensate is also called a mixture of condensate-forming chemical components. In this sense, the condensate can also be part of the gas phase. The phrase "gas contains condensate" means the presence of condensate-forming components in the gas phase. With a high content of condensate, the gas is called raw, in their absence - dry.

Abroad, a large-scale study of gas condensate deposits began in the 30s of the 20th century. Until that time, the term "gas condensate" was known only to a narrow circle of leading experts in the oil and gas industry. With the discovery and development of gas fields and the development of deep drilling, specialists encountered fields that were very rich in gas, and, unlike pure gas fields, the products contained a significant percentage of heavy hydrocarbons. Thus, deposits of a special type were discovered, later called gas condensate deposits. Initially, in the United States, these fields were operated as purely gas fields using gas as a fuel and a working agent in secondary production. In those cases when the field was located far from gas fields and industrial centers (i.e., the gas had no industrial use), such fields were mothballed. In other cases, when gas fountains were accompanied by the condensation of a certain amount of "motor fuel" in separators, and the gas could not be used industrially, entrepreneurs put up with the release of large amounts of gas into the atmosphere in pursuit of condensate - ready-made motor fuel. Condensate precipitation in the

separators with a decrease in pressure has been interpreted in different ways. Some attributed this to a sharp drop in temperature. Others believed that gas condensate fields were weakly saturated oil fields of a special grade of "white" (light) oil. During the exploitation of such deposits, in some cases, one had to deal with such incomprehensible phenomena as an increase in the gasoline content in gas with increasing pressure and a decrease with decreasing pressure. The enrichment of the gas phase with heavier hydrocarbons seemed just as anomalous. Such phenomena prompted researchers to study the behavior of gas mixtures in reservoir conditions. In 1936, for the first time, works were published on the study of the phenomena of retrograde condensation in gas condensate reservoirs. Based on the results of these works, technologies for the development and operation of gas condensate fields began to be created with the aim of more rational use of natural resources, since it became obvious that the operation of gas condensate fields as purely gas fields leads to the irretrievable loss of a significant amount of very valuable fuel. In 1936, V. Vougen proposed a cycling process to increase the recovery of condensate during the development of gas condensate deposits, the essence of which was the reinjection of dried gas into the formation. This technology has found wide application in the US and Canada, and then throughout the world. It has been successfully used to this day. Despite the fact that the features of the development and operation of gas condensate fields in the United States were widely covered in the American specialized literature, in our country this problem was not given due attention until the 1940s. M.Kh. Shakhnazarov "Theory and practice of exploitation of gas condensate fields", published in Baku in 1944 [1]. She introduced the engineering and technical workers of the oil and gas.

Технологический раздел(Technology section)

Таблица 1 - Состав газа взят из пособия газоконденсатных месторождений СССР[2]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S
91.46	2.36	0.4	0.21	0.5	0.3	2.8	1.97

Таблица 2 - Молекулярная масса компонентов газа

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S
16,43	30,07	44,097	58,123	72,15	28,013	44,01	34,08

Сумма i-тых компонентов смеси газа должна получиться 100

$$91,46+2,36+0,4+0,21+0,5+0,3+2,8+1,97=100$$

Таблица 3 - Состав газа взят из пособия газоконденсатных месторождений СССР[2]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S
0,9146	0,024	4*10 ⁻³	0,0021	0,5	0,3	2,8	1,97

$$0,9146+0,024+0,004+0,0021+0,5+0,3+2,8+1,97=1$$

Плотность(Density)

Таблица 4 - Плотность газов при 20 °С [ГОСТ 30319.1-96]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S
0,668	1,26	1,86	2,495	3,174	1,16	1,83	1,43

Плотность смеси газов

$$\rho_{см} := \frac{[(p1 \cdot c1) + (p2 \cdot c2) + (p3 \cdot c3) + (p4 \cdot c4) + (p5 \cdot c5) + (p6 \cdot c6) + (p7 \cdot c7) + (p8 \cdot c8)]}{100} = 0.752$$

При стандартных условиях (20 °С и давление 760 мм рт. ст. (101,3 кПа))

Плотность вещества (ρ) называется масса его в единице объема. Единицы измерения плотности: кг/м³, г/см³, кг/л, т/м³. В системе СИ кг/м³.

где $\rho_{см}$ – плотность моногазов, входящих в газовую смесь, при нормальных условиях, кг/м³;

c_i – объемное содержание отдельных моногазов в смеси, %.

Плотность газовой смеси по отношению к воздуху

$$S := \frac{\rho_{см}}{\rho_{в}} \quad S := \frac{0.752}{1.293} = 0.582 \quad \rho_{в} := 1.293$$

Молекулярная масса смеси(Molecular weight of the mixture)

Значение молекулярной массы смеси $N_{см}$ (кг/моль) вычисляется по формуле:

$$N_{см} := 22.4 \cdot \rho_{см} = 16.848$$

Вязкость(Viscosity)

Различают два вида вязкости: кинематическую и динамическую. Вязкость является одной из важных характеристик жидкостей и газов. Вязкость нефтепродуктов определяет их подвижность в условиях эксплуатации двигателей, машин и механизмов, существенно влияет на расход энергии при транспортировании, фильтрации, перемешивании. Вязкость определяет способность жидкости и газа сопротивляться взаимному перемещению их частиц. Вязкость характеризуется коэффициентом внутреннего трения μ или коэффициентом динамической вязкости называемым так же динамической вязкостью. Коэффициент динамической μ зависит от природы жидкости газа и температуры. Единица динамической вязкости в системе СИ паскаль секунда (Па*с). Для выражения динамической вязкости целесообразно применить дольную единицу-миллипаскаль-секунда (мПа*с). Нефтепереработке наиболее широко пользуется понятием кинематической вязкости. Кинематической вязкостью ν называется отношение динамической вязкости к плотности данной жидкости или газа при той же температуре[4]

$$\nu = \mu/\rho$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с

μ – коэффициент динамической вязкости, Па*с;

ρ – плотность, м³/кг

динамическая вязкость каждого компонента смеси газов при 20 С

Таблица 5 - данные взяты из литературы приведенной ниже[3]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S
0,00001028	0,000012	0,000007	0,000006	0,000006	0,000016	0,000013	0,0000
	23	50	90	23	65	67	1179

Далее мы нашли кинематическую вязкость для смеси газов которая у нас получилась $8,525 \cdot 10^{-5}$

Влажность газов(Humidity of gases)

При добыче природного газа и промышленном получении искусственных газов в их состав входит большое количество водяных паров, значительная часть которых удаляется при сушке. Содержание водяных паров в газовой смеси характеризует влажность газа. Различают абсолютную и относительную влажность.

Абсолютной влажностью называется физическая величина, численно равная массе водяных паров, содержащихся в единице объема. Измеряется абсолютная влажность в граммах или килограммах на кубический метр.

Относительной влажностью называется физическая величина, численно равная отношению фактической абсолютной влажности газа к максимально возможной, характеризующей состояние насыщения (максимальной влажности) при данной температуре.

Относительная влажность выражается в процентах и может быть также определена как отношение парциального давления водяного пара в газовой смеси P_{H_2O} к давлению насыщения пара P_S при той же температуре[4]

$$\varphi = (P_{H_2O} / P_S) / 100$$

Если рассматривать смесь газов заполняющих объем V при температуре T то парциальное давление можно найти $T=293$ $R=452.271$

Сперва я нашел парциальное давление для каждого элемента которую я привел в таблице ниже

Таблица 6 - Парциальное давление

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
$5.38 \cdot 10^3$	$5.553 \cdot 10^3$	$5.589 \cdot 10^3$	$5.68 \cdot 10^3$	$5.83 \cdot 10^3$	$5.487 \cdot 10^3$	$7.115 \cdot 10^3$	$5.56 \cdot 10^3$

Из полученных данных по парциальным давлениям нашел парциальное давление смеси которая получилась

$$P_{см} = 5,447 \cdot 10^5$$

Из полученных значений нашел относительную влажность газов которая получилась $2,33 \cdot 10^7$

Теплота сгорания газов (Calorific value of gases)

Под теплотой сгорания газа понимают количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 м³ газа, поступающего в горелку при нормальных условиях. При сгорании водородсодержащих компонентов газа образуются сильно перегретые водяные пары, так как температура горения более 1000 °С. [4]

Таблица 7 - Для расчета теплоты сгорания газов сперва находим значения точки высшей теплоты горения [ГОСТ 30319.1-96]

Наименование газа	Химическая формула	Теплота сгорания $H_{\text{ни}}$, МДж/м ³		Погрешность $\delta_{\text{ни}}, \%$
		высшая	низшая	
Метан	CH ₄	37,04	33,37	0,1
Этан	C ₂ H ₆	64,91	59,39	0,1
Пропан	C ₃ H ₈	92,29	84,94	0,2
<i>n</i> -Бутан	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	119,7	110,5	0,3
<i>i</i> -Бутан	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	119,3	110,1	0,3
<i>n</i> -Пентан	<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	147,0	136,0	—
<i>i</i> -Пентан	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	146,8	135,7	—
<i>n</i> -Гексан	<i>n</i> -C ₆ H ₁₄	174,5	161,6	—
<i>n</i> -Гептан	<i>n</i> -C ₇ H ₁₆	201,8	187,1	—
<i>n</i> -Октан	<i>n</i> -C ₈ H ₁₈	229,2	212,7	—
Ацетилен	C ₂ H ₂	54,09	52,25	0,1
Этилен	C ₂ H ₄	58,68	55,01	0,2
Пропилен	C ₃ H ₆	85,58	80,07	0,2
Бензол	C ₆ H ₆	137,3	131,8	—
Толуол	C ₇ H ₈	164,2	156,8	—
Моноксид углерода	CO	11,76	11,76	0,1
Водород	H ₂	11,89	10,05	0,1
Сероводород	H ₂ S	23,37	21,53	0,4
Аммиак	NH ₃	15,93	13,17	0,4
Метилмеркаптан	CH ₄ S	51,54	47,86	0,4

Также находим значения по изобарной теплоемкости по [ГОСТУ 30319_3-2015]

Таблица А.4 — Коэффициенты для расчета безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов природного газа в идеально-газовом состоянии по формуле (27)

Компонент	B_{α}	C_{α}	D_{α}	E_{α}	F_{α}	G_{α}	H_{α}	I_{α}	J_{α}
Метан	4,00088	0,76315	820,659	0,00460	178,410	8,74432	1062,82	-4,46921	1090,53
Этан	4,00263	4,33939	559,314	1,23722	223,284	13,1974	1031,38	-6,01989	1071,29
Пропан	4,02939	6,60569	479,856	3,19700	200,893	19,1921	955,312	-8,37267	1027,29
<i>i</i> -Бутан	4,06714	8,97575	438,270	5,25156	198,018	25,1423	1905,02	16,1388	893,765
<i>n</i> -Бутан	4,33944	9,44893	468,270	6,89406	183,636	24,4618	1914,10	14,7824	903,185
<i>i</i> -Пентан	4	11,7618	292,503	20,1101	910,237	33,1688	1919,37	0	0
<i>n</i> -Пентан	4	8,95043	178,670	21,8360	840,538	33,4032	1774,25	0	0

Окончание таблицы А.4

Компонент	B_G	C_G	D_{0i}	E_G	F_G	G_{0i}	H_G	I_{0i}	J_G
н-Гексан	4	11,6977	182,326	26,8142	859,207	38,6164	1826,59	0	0
Кислород	3,50146	1,07558	2 235,71	1,01334	1 116,69	0	0	0	0
Азот	3,50031	0,13732	662,738	-0,14660	680,562	0,90066	1740,06	0	0
Диоксид углерода	3,50002	2,04452	919,306	-1,06044	865,070	2,03366	483,553	0,01393	341,109
Гелий	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
Водород	2,47906	0,95806	228,734	0,45444	326,843	1,56039	1651,71	-1,3756	1671,69

Примечание — При расчете безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов природного газа в идеально-газовом состоянии по формуле (27) следует иметь в виду, что, если $H_{0i} = 0$, четвертое слагаемое в правой части формулы (27) принимают равным нулю.

Далее находим высшую теплоту сгорания для каждого компонента газа которая получилась $Q_{в1}=37,04$, $Q_{в2}=153,188$, $Q_{в3}=36,916$, $Q_{в4}=25,137$, $Q_{в5}=73,5$

$$Q_{в6}=3,789, Q_{в7}=65,436$$

Далее из полученных значений нашел высшую теплоту сгорания для смеси газа

$$Q_{см}=3,746 \cdot 10^3$$

Далее полученные значения вставляем в формулу для нахождения низшей теплоты сгорания

$$Q_n^p = Q_s^p - m_{H_2O} \cdot [r + c_p(t_s - t_k)],$$

m_{H_2O} – масса водяных паров, образующихся при полном сгорании 1 м³ газа, кг/м³; которая у нас вышла 2,51

r – теплота парообразования воды при соответствующем парциальном давлении водяных паров в продуктах сгорания, Дж/м³; она у нас вышла 2,51

c_p – изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); которую я приводил выше в таблице 4

t_s, t_k – температуры соответственно конденсации и охлажденного конденсата, °С. В нашем случае я взял 20 С и 0 С

Таким образом соотношение высшей и низшей теплоты сгорания получилась

$$Q=3.125 \cdot 10^3$$

Расчет аппаратов предприятий общественного питания производится по низшей рабочей теплоте сгорания, так как конденсация водяных паров в

газоходах недопустима из-за их интенсивной коррозии.

Низшая теплота сгорания смеси сухих горючих газов определяется по составу и теплоте сгорания отдельных моногазов:

$$Q_{\text{см}}^p = 0,01 \sum Q_{\text{H}_i}^p \cdot r_i,$$

Значения низшей точки теплоты сгорания я приводил в таблице [ГОСТ 30319.1-96]

$$Q_{\text{H}1}=3,37 \cdot 10^3, Q_{\text{H}2}=153,188, Q_{\text{H}3}=36,916, Q_{\text{H}4}=25,137, Q_{\text{H}5}=73,5$$

$$Q_{\text{H}6}=3,789, Q_{\text{H}7}=65,436, Q_{\text{H}8}=46,039$$

Таким образом низшая теплота сгорания для смеси получилась $3,762 \cdot 10^3$

Теоретический объем воздуха(Theoretical volume of air.)

Минимальный объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 м³ газа, поступающего в камеру сгорания при нормальных условиях, называют теоретическим объемом воздуха.[4]

Вычислить теоретический объем воздуха можно, исходя из потребности в кислороде для реакции окисления (горения) моногазов с учетом объемного содержания кислорода в воздухе.

$$V_0 = \frac{1}{20,9} \sum V_{0i} \cdot r_i,$$

где 20,9% – объемная доля кислорода в атмосферном воздухе;

V_{0i} – объем кислорода, необходимый для полного сгорания 1 м³ i -го моногаза при нормальных условиях;

r_i – объемное содержание i -го моногаза в смеси, %.

Сперва я нашел объем для каждого компонента занимающий объем V

$$V1=914.6 \quad V2=23.6 \quad V3= 4 \quad V4=2.1 \quad V5=5 \quad V6= 3 \quad V7=28 \quad V8=19.7$$

Далее из полученных значений находим общий объем который получился 47,847

Так же я нашел массу G для каждого компонента газа и после суммарную массу по формуле $G=(M \cdot V \cdot x)/22.4$ где M это молекулярная масса i -того компонента газа, V это объем, x это объем занимающий газ от 100%

$$G_{\text{CH}_4} = 613.553 \quad G_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.748 \quad G_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0.031 \quad G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0.011 \quad G_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 0.081 \quad G_{\text{N}_2} = 0.011$$

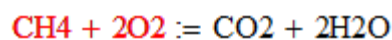
$$G_{\text{CO}_2} = 1.54 \quad G_{\text{H}_2\text{S}} = 0.59$$

Далее из полученных значений находим суммарную массу которая у нас получилась $G_{\text{см}} = 616,566$

Температура горения (combustion temperature)

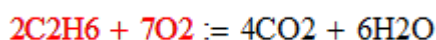
Под температурой воспламенения понимается минимальная температура газовой смеси, при которой при кратковременном воздействии внешнего источника пламени начинается процесс окисления (горения) и продолжается самопроизвольно без последующего подвода теплоты. Теоретическую температуру горения можно вычислить по формуле, получаемой из уравнения теплового баланса топки: Сначала для расчета температуры горения находим какой объем газа понадобится для полного сгорания i -того компонента газа [4]

Для метана



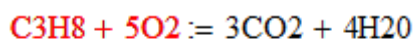
$$V_{01} := 2$$

Для этана



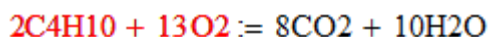
$$V_{02} := 3.5$$

Для пропана



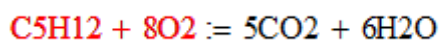
$$V_{03} := 5$$

Для бутана



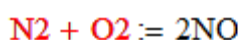
$$V_{04} := 6.5$$

Для пентана



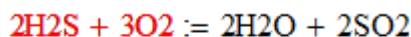
$$V_{05} := 8$$

Для азота



$$V_{06} := 1$$

Для сероводорода



$$V_{08} := 1.5$$

Таким образом из полученных значений находим для смеси газа которая получилась у нас 9,789

Теперь можно рассчитать теоретическую температуру горения газа из уравнения теплового баланса топки

$$T_{\text{г}} := \frac{Q_{\text{нсм}}}{v_1 \cdot c_1 + v_2 \cdot c_2} \quad T_{\text{н}} := 293 \quad \text{Срсм} := (0.76 \cdot c_1 + 4.33 \cdot c_2 + 6.6 \cdot c_3 + 9.44 \cdot c_4 + 11.76 \cdot c_5 + 0.137 \cdot c_6 + 2.044 \cdot c_7 + 1.051 \cdot c_8) \div 8 = 12.258$$

$$T_{\text{г}} := \frac{Q_{\text{нсм}}}{V_{\text{см}} \cdot \text{Срсм} \cdot 10^{-3}} = 6.413 \times 10^3$$

$$Q_{\text{тг}} := V_{\text{см}} \cdot \text{ср} \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{н}}) = 3.587 \times 10^6$$

Где $T_{\text{г}}$ -теоретическая температура горения

$Q_{\text{нсм}}$ низшая теплота сгорания которую мы нашли по формуле приведенной выше

Где $V_{\text{см}}$ -это объем смеси газов

Срсм это изобарная теплоемкость которую я нашел по значениям взятых из [ГОСТ 30319_3-2015]

Таблица А.4 — Коэффициенты для расчета безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов природного газа в идеально-газовом состоянии по формуле (27)

Компонент	B_{0i}	C_{0i}	D_{0i}	E_{0i}	F_{0i}	G_{0i}	H_{0i}	I_{0i}	J_{0i}
Метан	4,00088	0,76315	820,659	0,00460	178,410	8,74432	1062,82	-4,46921	1090,53
Этан	4,00263	4,33939	559,314	1,23722	223,284	13,1974	1031,38	-6,01989	1071,29
Пропан	4,02939	6,60569	479,856	3,19700	200,893	19,1921	955,312	-8,37267	1027,29
<i>i</i> -Бутан	4,06714	8,97575	438,270	5,25156	198,018	25,1423	1905,02	16,1388	893,765
<i>n</i> -Бутан	4,33944	9,44893	468,270	6,89406	183,636	24,4618	1914,10	14,7824	903,185
<i>i</i> -Пентан	4	11,7618	292,503	20,1101	910,237	33,1688	1919,37	0	0
<i>n</i> -Пентан	4	8,95043	178,670	21,8360	840,538	33,4032	1774,25	0	0

Окончание таблицы А.4

Компонент	B_{0i}	C_{0i}	D_{0i}	E_{0i}	F_{0i}	G_{0i}	H_{0i}	I_{0i}	J_{0i}
<i>n</i> -Гексан	4	11,6977	182,326	26,8142	859,207	38,6164	1826,59	0	0
Кислород	3,50146	1,07558	2 235,71	1,01334	1 116,69	0	0	0	0
Азот	3,50031	0,13732	662,738	-0,14660	680,562	0,90066	1740,06	0	0
Диоксид углерода	3,50002	2,04452	919,306	-1,06044	865,070	2,03366	483,553	0,01393	341,109
Гелий	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
Водород	2,47906	0,95806	228,734	0,45444	326,843	1,56039	1651,71	-1,3756	1671,69

Примечание — При расчете безразмерных изобарных теплоемкостей компонентов природного газа в идеально-газовом состоянии по формуле (27) следует иметь в виду, что, если $H_{0i} = 0$, четвертое слагаемое в правой части формулы (27) принимают равным нулю.

Таким образом теоретическая температура горения у нас получилась $T_{\text{г}} =$

$6,413 \cdot 10^3$

Далее мы нашли Q_{tt} теоретическая теплота сгорания

$V_{см}$ это объем смеси газа

C_p это изобарная теплоемкость

T_g это теоретическая температура горения

T_n это начальная температура

Итог теоретическая теплота сгорания Q_{tt} у нас получилась $3,587 \cdot 10^6$

Удельный объем (Specific volume)

величина, обратная плотности $v = \frac{1}{\rho}$.

Которая у нас получилась 1,33

Относительная плотность (Relative density)

$$\Delta = \frac{\rho}{\rho_{возд}}$$

Которая получилась у нас 0,616

Вязкость газа (Gas viscosity)

Свойство, являющееся причиной внутреннего трения, а следовательно, и сопротивления при движении в трубопроводе.

Вязкость газа динамическая определяется главным образом количеством движения, переносимым молекулами при переходе их из одного слоя в другой. При увеличении температуры возрастает скорость движения молекул и, следовательно, переносимое количество движения. Поэтому при повышении температуры вязкость возрастает. Зависимость динамической вязкости η от температуры T описывается формулой Сатерленда

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \frac{(273 + C)}{(T + C)},$$

где η_0 — вязкость при 273 К; C — постоянная величина.

Вязкость идеальных газов не зависит от давления. Вязкость реальных газов при

увеличении давления возрастает.

Сперва для расчета зависимости динамической вязкости находим коэффициент С(коэффициент Антуана)

C1=264,804 C3=248,116 C4=242,555 C5=233,493

Данные найдены из [пособия НПБ 105-95]

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения показателей пожарной опасности некоторых индивидуальных веществ

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг · моль ⁻¹	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж · кг ⁻¹
						A	B	CA				
1	Амилцетат	C ₇ H ₁₄ O ₂	130,196	+43	+290	6,29350	1579,510	221,365	25+147	1,08	ЛВЖ	29879
2	Амиден	C ₃ H ₁₀	70,134	<-18	+273	5,91048	1014,294	229,783	-60+100	1,49	ЛВЖ	45017
3	н - Амидиловый спирт	C ₃ H ₁₂ O	88,149	+48	+300	6,3073	1287,625	161,330	74+157	1,46	ЛВЖ	38385
4	Аммиак	NH ₃	17,03	-	+650	-	-	-	-	15,0	ГТ	18585
5	Анилин	C ₆ H ₇ N	93,128	+73	+617	6,04622	1457,02	176,195	35+184	1,3	ГЖ	32386
6	Ацетальдегид	C ₂ H ₄ O	44,053	-40	+172	6,31653	1093,537	233,413	-80+20	4,12	ЛВЖ	27071
7	Ацетилен	C ₂ H ₂	26,038	-	+335	-	-	-	-	2,5	ГТ (ВВ)	49965
8	Ацетон	C ₃ H ₆ O	58,08	-18	+535	6,37551	1281,721	237,088	-15+93	2,7	ЛВЖ	31360
9	Бензиловый спирт	C ₇ H ₈ O	108,15	+90	+415	-	-	-	-	1,3	ГЖ	-
10	Бензол	C ₆ H ₆	78,113	-11	+560	5,61391 6,10906	902,275 1252,776	178,099 225,178	-20+6 -7+80	1,43	ЛВЖ	40576
11	1,3-Бутадиен	C ₄ H ₆	54,091	-	+430	-	-	-	-	2,0	ГТ	44573
12	н-Бутан	C ₄ H ₁₀	58,123	-69	+405	6,00525	968,098	242,555	-130+0	1,8	ГТ	45713
13	1-Бутен	C ₄ H ₈	56,107	-	+384	-	-	-	-	1,6	ГТ	45317
14	2-Бутен	C ₄ H ₈	56,107	-	+324	-	-	-	-	1,8	ГТ	45574
15	н-Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	+29	+330	6,25205	1430,418	210,745	59+126	1,35	ЛВЖ	28280
16	втор-Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	+19	+410	-	-	-	-	1,4	ЛВЖ	28202
17	н - Бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,122	+35	+340	8,72232	2664,684	279,638	-1+126	1,8	ЛВЖ	36805
18	Винилхлорид	C ₂ H ₃ Cl	62,499	-	+470	6,0161	905,008	239,475	-65+ -13	3,6	ГТ	18496
19	Водород	H ₂	2,016	-	+510	-	-	-	-	4,12	ГТ	119841
20	н - Гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	226,44	+128	+207	5,91242	1656,405	136,869	105+287	0,47	ГЖ (ГТВ)	44312
21	н - Гексан	C ₆ H ₁₄	86,177	-23	+233	5,99517	1166,274	223,661	-54+69	1,24	ЛВЖ	45105
22	н - Гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	102,17	+60	+285	6,17894 7,23663	1293,831 1872,743	152,631 202,666	52+157 60+108	1,2	ЛВЖ	39587
23	Гептан	C ₇ H ₁₆	100,203	-4	+223	6,07647	1295,405	219,819	60+98	1,07	ЛВЖ	44919

24	Гидразин	N ₂ H ₄	32,045	+38	+132	7,99805	2266,447	266,316	84+112	4,7	ЛВЖ (ВВ)	14644
25	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	92,1	+198	+400	8,177393	3074,220	214,712	141263	2,6	ГЖ	16102
26	Декан	C ₁₀ H ₂₂	142,28	+47	+230	6,52023	1809,975	227,700	17+174	0,7	ЛВЖ	44602
27	Дивиниловый эфир	C ₄ H ₈ O	70,1	-30	+360	-	-	-	-	1,7	ЛВЖ	32610
28	N, N-Диметилформамид	C ₃ H ₇ ON	73,1	+53	+440	6,15939	1482,985	204,342	25+153	2,35	ЛВЖ	-
29	1,4-Диоксан	C ₄ H ₈ O ₂	88,1	+11	+375	6,64091	1632,425	250,725	12+101	2,0	ЛВЖ	-
30	1,2-Дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	98,96	+9	+413	6,78615	1640,179	259,715	-24+83	6,2	ЛВЖ	10873
31	Диэтиламин	C ₄ H ₁₁ N	73,14	-14	+310	6,34794	1267,557	236,329	-33+59	1,78	ЛВЖ	34876
32	Диэтиловый эфир	C ₄ H ₁₀ O	74,12	-41	+180	6,12270	1098,945	232,372	-60+35	1,7	ЛВЖ	34147
33	н - Додекан	C ₁₂ H ₂₆	170,337	+77	+202	7,29574	2463,739	253,884	48+214	0,63	ГЖ	44470
34	Изобутан	C ₄ H ₁₀	58,123	-76	+462	5,95318	916,054	243,783	-159+12	1,81	ГТ	45578
35	Изобутилен	C ₄ H ₈	56,11	-	+465	-	-	-	-	1,78	ГТ	45928
36	Изобутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,12	+28	+390	7,83005	2058,392	245,642	-9+116	1,8	ЛВЖ	36743
37	Изопентан	C ₅ H ₁₂	72,15	-52	+432	5,91799	1022,551	233,493	-83+28	1,35	ЛВЖ	45239
38	Изопропилбензол	C ₉ H ₁₂	120,20	+37	+424	6,06756	1461,643	207,56	2,9+152,4	0,88	ЛВЖ	46663
39	Изопропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,09	+14	+430	7,51055	1733,00	232,380	-26+148	2,23	ЛВЖ	34139
40	м - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+28	+530	6,13329	1461,925	215,073	-20+220	1,1	ЛВЖ	52829
41	о - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+31	+460	6,28893	1575,114	223,579	-3,8+144,4	1,0	ЛВЖ	41217
42	п - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+26	+528	6,25485	1537,082	223,608	-8,1+138,3	1,1	ЛВЖ	41207
43	Метан	CH ₄	16,04	-	+537	5,68923	380,224	264,804	-182+ -162	5,28	ГТ	50000
44	Метиловый спирт	CH ₃ O	32,04	+6	+440	7,3527	1660,454	245,818	-10+90	6,98	ЛВЖ	23839
45	Метилпропилкетон	C ₅ H ₁₀ O	86,133	+6	+452	6,98913	1870,4	273,2	-17+103	1,49	ЛВЖ	33879
46	Метилэтилкетон	C ₄ H ₈ O	72,107	-6	-	7,02453	1292,791	232,340	-48+80	1,90	ЛВЖ	-
47	Нафталин	C ₁₀ H ₈	128,06	+80	+520	9,67944 6,7978	3123,337 2206,690	243,569 245,127	0+80 80+159	0,9	ГТВ	39435
48	н - Нонан	C ₉ H ₂₀	128,257	+31	+205	6,17776	1510,695	211,502	2+150	0,78	ЛВЖ	44684
49	Оксид углерода	CO	28,01	-	+605	-	-	-	-	12,5	ГТ	10104
50	Оксид этилена	C ₂ H ₄ O	44,05	-18	+430	-	-	-	-	3,2	ГТ (ВВ)	27696
51	н - Октан	C ₈ H ₁₈	114,230	+14	+215	6,09396	1379,556	211,896	-14+126	0,9	ЛВЖ	44787
52	н - Пентадекан	C ₁₅ H ₃₂	212,42	+115	+203	6,0673	1739,084	157,545	92+270	0,5	ГЖ	44342
53	н - Пентан	C ₅ H ₁₂	72,150	-44	+286	5,97208	1062,555	231,805	-50+36	1,47	ЛВЖ	45350
54	γ-Пиколин	C ₆ H ₇ N	93,128	+39	+578	6,44382	1632,315	224,787	70+145	1,4	ЛВЖ	36702
55	Пиридин	C ₅ H ₅ N	79,10	+20	+530	5,91684	1217,730	196,342	-19+116	1,8	ЛВЖ	35676
56	Пропан	C ₃ H ₈	44,096	-96	+470	5,95547	813,864	248,116	-189+ -42	2,3	ГТ	46353
57	Пропилен	C ₃ H ₆	42,080	-	+455	5,94852	786,532	247,243	-107,3+ -47,1	2,4	ГТ	45604

58	н - Пропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,09	+23	+371	7,44201	1751,981	225,125	0+97	2,3	ЛВЖ	34405
59	Сероводород	H ₂ S	34,076	-	+246	-	-	-	-	4,3	ГТ	-
60	Сероуглерод	CS ₂	76,14	-43	+102	6,12537	1202,471	245,616	-15+80	1,0	ЛВЖ	14020
61	Стирол	C ₈ H ₈	104,14	+30	+490	7,06542	2113,057	272,986	-7+146	1,1	ЛВЖ	43888
62	Тetraгидрофуран	C ₄ H ₈ O	72,1	-20	+250	6,12008	1202,29	226,254	23+100	1,8	ЛВЖ	34730
63	н - Tetрадекан	C ₁₄ H ₃₀	198,39	+103	+201	6,40007	1950,497	190,513	76+254	0,5	ГЖ	44377
64	Толуол	C ₇ H ₈	92,140	+7	+535	6,0507	1328,171	217,713	-26,7+110,6	1,27	ЛВЖ	40936
65	н - Тридекан	C ₁₃ H ₂₈	184,36	+90	+204	7,09388	2468,910	250,310	59+236	0,58	ГЖ	44424
66	2,2,4 - Триметилпентан	C ₈ H ₁₈	114,230	-4	+411	5,93682	1257,84	220,735	-60+175	1,0	ЛВЖ	44647
67	Уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	60,05	+40	+465	7,10337	1906,53	255,973	-17+118	4,0	ЛВЖ	13097
68	н - Ундекан	C ₁₁ H ₂₄	156,31	+62	+205	6,80501	2102,959	242,574	31+197	0,6	ГЖ	44527
69	Формальдегид	CH ₂ O	30,03	-	+430	5,40973	607,399	197,626	-19+60	7,0	ГТ	19007
70	Фталевый ангидрид	C ₈ H ₄ O ₃	148,1	+153	+580	7,12439	2879,067	277,501	134+285	1,7 (15г · м ⁻³)	ТГВ	-
71	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	112,56	+29	+637	6,38605	1607,316	235,351	-35+132	1,4	ЛВЖ	27315
72	Хлорэтан	C ₂ H ₅ Cl	64,51	-50	+510	6,11140	1030,007	238,612	-56+12	3,8	ГТ	19392
73	Циклогексан	C ₆ H ₁₂	84,16	-17	+259	5,96991	1203,526	222,863	6,5+200	1,3	ЛВЖ	43833
74	Этан	C ₂ H ₆	30,069	-	+515	-	-	-	-	2,9	ГТ	52413
75	Этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	88,10	-3	+446	6,22672	1244,951	217,881	15+75,8	2,0	ЛВЖ	23587
76	Этилбензол	C ₈ H ₁₀	106,16	+20	+431	6,35879	1590,660	229,581	-9,8+136,2	1,0	ЛВЖ	41323
77	Этилен	C ₂ H ₄	28,05	-	+435	-	-	-	-	2,7	ГТ	46988
78	Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂	62,068	+111	+412	8,13754	2753,183	252,009	53+198	4,29	ГЖ	19329
79	Этиловый спирт	C ₂ H ₆ O	46,07	+13	+400	7,81158	1918,508	252,125	-31+78	3,6	ЛВЖ	30562
80	Этилцеллозольв	C ₄ H ₁₀ O ₂	90,1	+40	+235	7,86626	2392,56	273,15	20+135	1,8	ЛВЖ	26382

После как нашли коэффициенты Антуана

находим динамическую вязкость для нашей смеси газов при 0 С в нашем случае мы уже находили выше которая у нас получилась $8,525 \cdot 10^{-5}$

Далее найденные значения вставляем в формулу. Таким образом зависимость динамической вязкости от температуры получилась $9,127 \cdot 10^{-5}$

Теплоемкость (массовая удельная) есть количество тепла, необходимое для

нагрева единицы массы газа на один градус: $c = \frac{dq}{dT}$; размерность Дж/кг⁰К.

Для расчета удельной теплоемкости находим внутреннюю энергию теплоты

Эту теплоту я находил ранее по формуле

$$Q_{tt} = V_{cm} \cdot c_p \cdot (T_r - T_n) = 3.587 \times 10^6$$

Температура у нас есть 20 С

Далее вставляем в формулу. Таким образом удельная теплоемкость у нас 19,857

Теплоемкость зависит от природы газа и от происходящего процесса. Если газ нагревается изохорически, то подводимое тепло q идет на увеличение внутренней энергии u : теплоемкость при постоянном объеме

$$c_v = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT}$$

Изохорическая теплоемкость получилась у нас 1,044

Далее рассчитываем изобарную теплоемкость по формуле:

$$c_p = c_v + R,$$

Где R это газовая постоянная

Изобарная теплоемкость C_p у нас получилась 453,315

Эффект Джоуля–Томсона (Joule-Thomson effect)

Это изменение температуры реального газа при дросселировании. Дросселированием в газопроводе можно считать распределенное по длине падение давления. При обычных для газопроводов давлении и температуре дросселирование сопровождается охлаждением газа. Снижение температуры газа при движении его по трубопроводу из-за эффекта Джоуля — Томсона можно объяснить так. Считается, что дроссельный процесс энергетически изолирован. В этом случае внутренняя энергия остается неизменной. Неизменной остается и энтальпия. Внутренняя энергия включает в себя кинетическую энергию молекул и потенциальную энергию их взаимодействия. Газ при движении по газопроводу расширяется. В результате увеличивается расстояние между молекулами и, следовательно, возрастает потенциальная энергия их взаимного притяжения. Но поскольку внутренняя энергия, как было сказано, остается неизменной, увеличение потенциальной энергии сопровождается уменьшением кинетической энергии молекул, т. е. снижением температуры газа. Эффект снижения температуры газа при дросселировании характеризуется коэффициентом Джоуля—Томсона

$$D_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i.$$

Где T это у нас температура и P давление

Коэффициент Джоуля Томсона у нас получилась 8,142

Газовые смеси (Gas mixtures)

Любой природный газ – смесь газов. Состав смеси может быть выражен в объемных, мольных и массовых долях. Объемная, мольная и массовая концентрации i -го компонента в смеси будут соответственно

$$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i}; \quad y'_i = \frac{N_i}{\sum N_i}; \quad y_i = \frac{m_i}{\sum m_i}.$$

где v_i – объем i -го компонента; N_i – число молей в объеме V_i ; m_i – масса i -го компонента.

$V_{i1}=19.115$ $V_{i2}=0.493$ $V_{i3}=0.084$ $V_{i4}=0.044$ $V_{i5}=0.105$ $V_{i6}=0.063$ $V_{i7}=0.585$ $V_{i8}=0.412$
 $Y_{i1}=0.05$ $Y_{i2}=0.092$ $Y_{i3}=0.135$ $Y_{i4}=0.178$ $Y_{i5}=0.221$ $Y_{i6}=0.086$ $Y_{i7}=0.135$ $Y_{i8}=0.104$

Уравнение состояния реальных газов(Equation of state of real gases)

Существует очень много уравнений состояния для реальных газов. Но использование их при расчетах газопроводов почти всегда приводит к весьма громоздким выкладкам. Поэтому обычно пользуются скорректированным уравнением Клапейрона:

$$\frac{p}{\rho} = zRT,$$

в котором отклонения от законов идеального газа учитываются множителем z , называемым коэффициентом сжимаемости (или сверхсжимаемости, это точнее). Коэффициент z зависит от давления и температуры. При обычных для магистральных газопроводов условиях $z < 1$ (сверхсжимаемость). Коэффициент сжимаемости зависит от состава газа: чем газ тяжелее, тем z меньше[4]

Для расчета уравнения состояния реальных газов сперва находим газовую постоянную R по формуле

$8314,3/m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 \dots$ и тд

R у нас получилась 452,271

Далее вставляем в формулу таким образом из уравнения состояния реального газа находим коэффициент сжимаемости которая у нас получилась 0,889

Приведенные давления и температура(Reduced pressures and temperatures)

Далее находим критические температуры и давления для дальнейшего нахождения приведенных температур и давлений

$$\frac{p}{p_{кр}} \text{ и } \frac{T}{T_{кр}}$$

Критические температуры $T_{кр}=355,01$ и $P_{кр}=0,5 \cdot 10^6$

Критическую температуру нашел по формуле которую взял из справочника Сарданашвили

$$T_{кр} = (355.1 + 0.97 \cdot a) - (0.00049 \cdot a^2) = 355.101$$

Степень а нашел из пособия [Сарданашвили приложение 1]

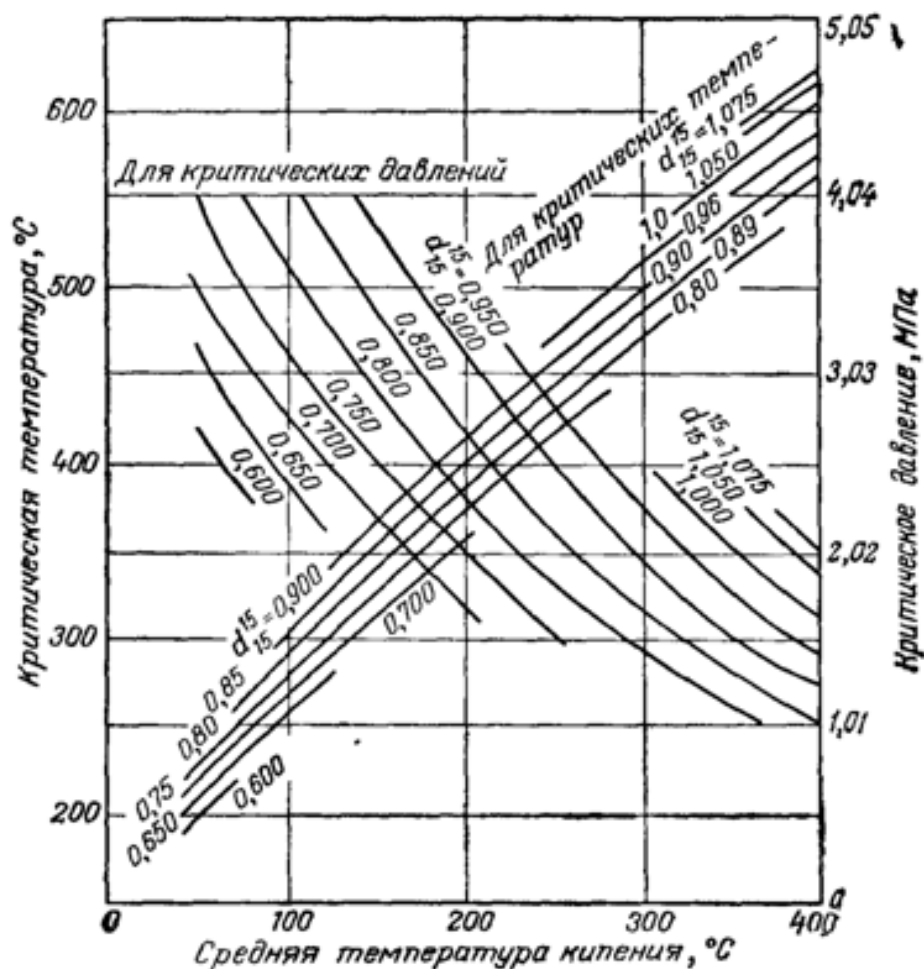
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОПРАВКА (α) ДЛЯ ПОДСЧЕТА ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ К ФОРМУЛЕ (8)

d_4^{20}	α	d_4^{20}	α
0,7000—0,7099	0,000897	0,8500—0,8599	0,000699
0,7100—0,7199	0,000884	0,8600—0,8699	0,000686
0,7200—0,7299	0,000870	0,8700—0,8799	0,000673
0,7300—0,7399	0,000857	0,8800—0,8899	0,000660
0,7400—0,7499	0,000844	0,8900—0,9099	0,000647
0,7500—0,7599	0,000831	0,9000—0,9199	0,000633
0,7600—0,7699	0,000818	0,9100—0,9199	0,000620
0,7700—0,7799	0,000805	0,9200—0,9299	0,000607
0,7800—0,7899	0,000792	0,9300—0,9399	0,000594
0,7900—0,7999	0,000778	0,9400—0,9499	0,000581
0,8000—0,8099	0,000765	0,9500—0,9599	0,000567
0,8100—0,8199	0,000752	0,9600—0,9699	0,000554
0,8200—0,8299	0,000738	0,9700—0,9799	0,000541
0,8300—0,8399	0,000725	0,9800—0,9899	0,000522
0,8400—0,8499	0,000712	0,9900—1,000	0,000515

214

Далее критическое давление $P_{кр}=0,5 \cdot 10^6$ определил из справочника [Сарданашвили страница 20 график 6]



После того как мы нашли $R_{кр}$ и $T_{кр}$ находим приведенные температуры $T_{пр}$ и давление $P_{пр}$ которые у нас получились $T_{пр}=0,825$ и $P_{пр}=1,089$

Плотность жидкого продукта (Liquid product density)

$\rho_{ж} = (v_i \times \rho_i)$; $\rho_{1ж}=12,769$ $\rho_{2ж}=0,621$ $\rho_{3ж}=0,155$ $\rho_{4ж}=0,11$ $\rho_{5ж}=0,332$ $\rho_{6ж}=0,073$
 $\rho_{7ж}=1,071$ $\rho_{8ж}=0,589$

Плотность газообразного продукта (Gaseous product density)

$\rho_{г} = M/24.04$ $\rho_{г1}=0,62$ $\rho_{г2}=0,03$ $\rho_{г3}=7,337 \cdot 10^{-3}$ $\rho_{г4}=5,077 \cdot 10^{-3}$ $\rho_{г5}=0,01$
 $\rho_{г6}=3,496$ $\rho_{г7}=0,051$ $\rho_{г8}=0,028$

Динамическая вязкость жидкого продукта (Dynamic viscosity of liquid product)

Динамическая вязкость продукта (μ_j , мПа·с) при стандартных условиях (20 °С; 0.101 МПа) определяется по формуле

$$\mu_j = [\sum(Z_i \times \mu_i^{1/3})]^3,$$

где μ_i - динамическая вязкость i -го компонента продукта. Так же, как и плотность, вязкость газообразных компонентов является не истинной, а «кажущейся» (условной вязкостью компонента в псевдосжиженном состоянии при стандартных условиях).

Таким образом динамическая вязкость жидкого продукта у нас получилась $\mu_{жтп} = 2,98 \cdot 10^{-3}$

Динамическая вязкость жидкого продукта ($\mu_{жтр}$, мПа·с) при рабочих условиях определяют по уравнению

$$\mu_{жтр} = \mu_j \times \exp[\sigma \times (P - 0.101)] / \exp[\tau \times (t - 20)].$$

В этом уравнении: σ - барический коэффициент вязкости; τ - термический коэффициент вязкости; P , t - рабочие условия - давление в МПа и температура в °С.

Коэффициенты вязкости вычисляют в зависимости от молекулярной массы продукта (M) по формулам

$$\sigma = 4.24 / 100000 \times M + 6.82 / 1000;$$

$$\tau = 1.02 / 1000000 \times M^{1.87} + 5.48 / 1000.$$

Для расчета динамической вязкости при рабочих условиях сперва находим барический коэффициент σ который у нас получился $7,63 \cdot 10^{-3}$

Далее находим термический коэффициент τ вязкости который у нас получился $5,743 \cdot 10^{-3}$

Далее полученные значения вставляем в формулу для рабочих условий Динамической вязкости которая получилась $3,874 \cdot 10^{-3}$

Динамическая вязкость газообразного продукта (Dynamic viscosity of the gaseous product)

Динамическая вязкость газообразного продукта (μ_{gt} , мПа·с) при температуре t определяется по формуле

$$\mu_{gt} = K \times \exp[X \times (\rho_{г}/103)Y].$$

Коэффициенты уравнения вычисляются в зависимости от молекулярной массы продукта следующим образом:

$$K = \{(9.41 + 0.02 \times M) \times [1.8 \times (t + 273/15)]^{1.5}\} \times 10^{-4} / [209 + 19 \times M + 1.8 \times (t + 273/15)];$$

$$X = 3.5 + 986 / [1.8 \times (t + 273/15)] + 0.01 \times M;$$

$$Y = 2.4 - 0.2 \times X.$$

$$K = 0,011 \quad X = 5,451 \quad Y = 1,31$$

$$\mu_{gt} = 0.011$$

Далее находим кинематическую вязкость для жидкого и газообразного продукта по формуле

$$V = \mu_{жтп} / \rho_{ж} = 2,464 \times 10^{-4}$$

$$V = \mu_{gt} / \rho_{г} = 0,015$$

Поверхностное натяжение жидкости и (Surface tension of liquid)

Поверхностное натяжение жидкости ($\sigma_{ж}$, мН×м) определяется в зависимости от ее плотности ($\rho_{ж}$, кг/м³) по формуле

$$\sigma = (0.0532 \times \rho_{ж} - 15.5) \times (1.056 - 0.0028t) \times (0.0000199 \times (P \times 9.81)^2 - 0.0081 \times (P \times 9.81) + 0.9668)$$

где t и P - температура (°C) и давление (МПа) потока.

σ у нас получилась -38,058

Температура застывания и помутнения (Pour and cloud point)

Температура застывания и помутнения

$$(t_z + 273.15)^{n_z} = \sum [v_i \times (t_{zi} + 273.15)^{n_z}]; (t_{п} + 273.15)^{n_{п}} = \sum [v_i \times (t_{zi} + 273.15)^{n_{п}}],$$

где n_z и $n_{п}$ - показатели степени, которые в общем случае подбираются

эмпирически. Для углеводородных продуктов газоконденсатных и нефтяных залежей северных месторождений Тюменской области получено $n_z = 8$, $n_p = 1$. Аналогичным образом можно рассчитывать и температуру начала кристаллизации, которая близка температуре помутнения.

T_z и T_p определены по ГОСТ [ГОСТ Р 56718-2015]

$T_z = 258$ $T_{zi} = -247$ $T_p = -60$ $T_{pi} = 249,897$ далее найденные значения вставляем

Температура застывания получилась $-5,709 \cdot 10^3$

Температура помутнения получилась $-249,897$

Октановое число (Octane number)

Октановое число

$$O = [\sum(O_i \times Z_i)] / 100$$

где O_i - октановое число i -го компонента, которое является справочной величиной для индивидуальных углеводородов, а для узких фракций оно определяется экспериментально. Это уравнение позволяет вычислять октановое число как по моторному, так и по исследовательскому методу, в зависимости от того, какое октановое число будет задано в O_i . По уравнению можно рассчитать и октановое число автобензина, компаундированного высокооктановыми добавками, если определить для них так называемое октановое число смешения.[4]

Для расчета октанового числа сперва нашел октановое число для каждого компонента газа

$$O_{i1} = 110 \quad O_{i1} = 108 \quad O_{i1} = 105 \quad O_{i1} = 94 \quad O_{i1} = 70 \quad O_{i1} = 100$$

По найденным значениям находим октановое число для смеси газов которая получилась 104,723

Константа фазового равновесия (Phase equilibrium constant)

При выполнении технологических расчетов процессов и схем переработки УВС базовым разделом является определение составов продуктов в процессе фазовых переходов (при сепарации, ректификации, нагревании, охлаждении и т.п.) Для термодинамических условий стабилизации и первичной переработки (в

области относительно невысоких давлений и повышенных температур) фазовые равновесия с приемлемой точностью можно рассчитывать по константам фазового равновесия. Ниже приведены рекомендуемые формулы.[4]

Константы фазового равновесия компонентов у/в продукта (k_i) определяются в зависимости от давления (P , МПа) и температуры (t , °С) по уравнению

$$k_i = (1/P) \times 10^{(A \times F_i + B)}$$

Коэффициенты A , F и B вычисляются следующим образом:

$$A = 6.1 \times 10^{-5} \times P^3 + 1.86 \times 10^{-3} \times P^2 - 4.89 \times 10^{-2} \times P + 1.0049$$

$$B = 1.79 \times 10^{-4} \times P^3 - 5.16 \times 10^{-3} \times P^2 + 12.59 \times 10^{-2} \times P + 1.0127$$

$$F_i = b_i \times [1/T_{bi} - 1/(273.15 + t)]$$

Константы b_i и T_{bi} являются справочными данными и приведены в приложениях. Тем не менее их можно рассчитывать как функции от молекулярной массы по нижеприведенным уравнениям.

Для нормальных парафинов:

$$\lg(b_i) = 1.9399 + 0.6446 \times \lg(M_i)$$

$$\lg(T_{bi}) = 1.8298 + 2.4583 \times \lg[\lg(M_i)]$$

Сперва для расчета константы фазового равновесия находим степени $Lg(b_i)$ которая получилась 0,442 и степень $lg(T_{bi})$ которая вышла 0,321

Далее найденные

Вставляем в формулу для нахождения степеней A B F_i

$$A=2,487 \quad B=2,613 \quad F_i=1,374$$

Далее находим константу фазового равновесия K которая получилась 1,967

После расчета константы фазового равновесия находим состав равновесного пара выделяющая из состава Z

$$Y_i = 100 \times \{ (Z_i/100) \times k_i / [1 + (k_i - 1) \times e] \}$$

где e - мольная доля отгона пара.

Расчет состава пара выполняют методом последовательных приближений - задаются долей отгона (в пределах от 0 до 1), после чего вычисляют Y_i проверяют выполнение условия равновесия паровой и жидкой фаз $\sum Y_i = 100$. В случае невыполнения меняют значение e , повторяют расчет. После завершения

подбора ϵ рассчитывают состав равновесной жидкости (X_i , % мольных):

Сперва для расчета подбираем коэффициент ϵ -мольную долю отгона пара у меня она получилась 0,154528

Далее вставляем полученное значение в формулу и получаем Y_i 32,68

$$X_i = Y_i/k_i = 16,618$$

После этого можно определять свойства потоков по вышеприведенным уравнениям, задавая для пара $Z_i = Y_i$, для жидкости - $Z_i = X_i$. После расчета молекулярных масс пара и жидкости можно определить массовую долю отгона пара (g), которую необходимо знать для расчета материального баланса процесса:

$$g = \epsilon \times M_{\text{п}} / [\epsilon \times M_{\text{п}} + (1 - \epsilon) \times M_{\text{ж}}]$$

где $M_{\text{п}}$ - молекулярная масса газообразного, $M_{\text{ж}}$ - жидкого равновесных продуктов.

Таким образом g у нас получились 0,264

Константы псевдоравновесия вычисляются на основе констант равновесия по формуле

$$K_i = k_i \alpha.$$

Где α это степень альфа

Нами выяснено, что уравнение Старлинга—Хана может быть распространено и на более тяжелые углеводороды, если действительные значения критической плотности, фигурирующие в уравнении, заменить на соответствующие им «эквивалентные» величины, вычисляемые по формуле:

Эквивалентная критическая плотность углеводорода (equivalent critical hydrocarbon density)

$$D_{\text{кр}} = (95,266 - 0,24293 T_{\text{н}} + 338,54 \rho_{420}) / M = 16,81$$

где $D_{\text{кр}}$ - «эквивалентная» критическая плотность углеводорода или приравненной к нему фракции конденсата (нефти) (кмоль/м³) с нормальной температурой кипения $T_{\text{н}}$ (К), относительной плотностью ρ_{420} (г/см³) и

молекулярной массой M .

Метановое число(methane number)

Метановое число — показатель, характеризующий детонационную стойкость газообразного топлива для двигателей внутреннего сгорания. Число равно содержанию метана в его смеси с водородом, при котором эта смесь эквивалентна по детонационной стойкости исследуемому топливу в стандартных условиях испытаний. Метод вычисления метанового числа, приведенный в настоящем стандарте, основан на оригинальных данных исследовательской программы, выполненной AVL Deutschland GmbH для FVV (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen/Research Association for Combustion Engines). Настоящий стандарт применяют для определения метанового числа природного газа по измеренному газохроматографическим методом компонентному составу (как правило, в молярных долях), содержание компонентов ограничено диапазонами[4]

Для определения метанового числа я привел метановые числа для каждого компонента газа из смеси

Таблица 8

метановые числа взятые из [Гост ГОСТ 34704-2020]

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
96.245	2.94	0.045	0.0067	0.0029	0.275	0.42

Таблица А.3 – Начальные значения метанового числа {MN_i} выбранных трехкомпонентных смесей

Наименование компонента	Объемная доля упрощенного состава, %		Выбранные смеси и объемные доли их компонентов, %					
	ненормированные r_{i1} , %	нормированные r_{i1}^n , %	Mix2		Mix3		Mix4	
			ненормированные r_{i2} , %	нормированные r_{i2}^n , %	ненормированные r_{i3} , %	нормированные r_{i3}^n , %	ненормированные r_{i4} , %	нормированные r_{i4}^n , %
Метан	97,0797	97,9231	32,6410	97,1370	32,6410	99,3961	32,6410	97,2687
Этан	1,6658	1,6803	0,8401	2,5002	0,0000	0,0000	0,8401	2,5036
Пропан	0,2417	0,2438	0,1219	0,3628	0,1219	0,3712	0,0000	0,0000
n-Бутан	0,1515	0,1528	0,0000	0,0000	0,0764	0,2326	0,0764	0,2277
Итого	99,1387	100,0000	33,6031	100,0000	32,8393	100,0000	33,5576	100,0000
$\Sigma(r_i/100)$				0,3360		0,3284		0,3356
MN _i				91,4176		93,3436		88,3857

Таблица А.4 – Значения метанового числа {MN_i} выбранных трехкомпонентных смесей, полученные в результате решения системы нелинейных уравнений (7), и рассчитанное значение метанового числа смеси метан-диоксид углерода-азот (Mix5)

Наименование компонента	Объемная доля упрощенного состава, %		Выбранные смеси и объемные доли их компонентов, %							
	ненормированные r_{i1} , %	нормированные r_{i1}^n , %	Mix2		Mix3		Mix4		Mix5	
			ненормированные r_{i2} , %	нормированные r_{i2}^n , %	ненормированные r_{i3} , %	нормированные r_{i3}^n , %	ненормированные r_{i4} , %	нормированные r_{i4}^n , %	ненормированные r_{i5} , %	нормированные r_{i5}^n , %
Метан	97,0797	97,9231	30,9366*	96,9520	22,2007*	99,0167	44,7857**	98,0647	99,1387	99,9467
Этан	1,6658	1,6803	0,8648*	2,7101	0,0000	0,0000	0,8155**	1,7857		
Пропан	0,2417	0,2438	0,1078*	0,3378	0,1360**	0,6067	0,0000	0,0000		
n-Бутан	0,1515	0,1528	0,0000	0,0000	0,0844*	0,3766	0,0684**	0,1497		
Диоксид углерода									0,0528	0,0533
Азот									0,8715	
Итого	99,1387	100,0000	31,9092	100,0000	22,4212	100,0000	45,6696	100,0000	100,0631	100,0000
$\Sigma(r_i/100)$				0,3191		0,2242		0,4567		
MN _i				91,0088		91,0086		91,0086		100,0492

Примечания:
 * – объемные доли компонентов, корректируемые в соответствии с выбранным методом решения системы уравнений (7);
 ** – объемные доли компонентов, рассчитываемые из системы уравнений материального баланса по формуле (8).

Далее из найденных значений я нашел метановое число для смеси газов которая получилась 88,08

РЕЗУЛЬТАТЫ(RESULTS)

CH ₄	c1 := 91.46	x1 := $\frac{91.46}{100} = 0.915$	p1 := 0.668	m1 := 0.00001028	mm1 := 16.43
C ₂ H ₆	c2 := 2.36	x2 := $\frac{2.36}{100} = 0.024$	p2 := 1.26	m2 := 0.00001223	mm2 := 30.070
C ₃ H ₈	c3 := 0.40	x3 := $\frac{0.4}{100} = 4 \times 10^{-3}$	p3 := 1.86	m3 := 0.00000750	mm3 := 44.097
C ₄ H ₁₀	c4 := 0.21	x4 := $\frac{0.21}{100} = 2.1 \times 10^{-3}$	p4 := 2.495	m4 := 0.00000690	mm4 := 58.123
C ₅ H ₁₂	c5 := 0.5	x5 := $\frac{0.5}{100} = 5 \times 10^{-3}$	p5 := 3.174	m5 := 0.00000623	mm5 := 72.15
N ₂	c6 := 0.3	x6 := $\frac{0.3}{100} = 3 \times 10^{-3}$	p6 := 1.16	m6 := 0.00001665	mm6 := 28.013
CO ₂	c7 := 2.8	x7 := $\frac{2.8}{100} = 0.028$	p7 := 1.83	m7 := 0.00001367	mm7 := 44.010
H ₂ S	c8 := 1.97	x8 := $\frac{1.97}{100} = 0.02$	p8 := 1.43	m8 := 0.00001179	mm8 := 34.082
				mw := 19.1	
			Tк := (111.3 · x1) + (184.4 · x2) + (230.9 · x3) + (272.5 · x4) + (309.1 · x5) + (77.4 · x6) + (194.54 · x7) + (213 · x8) = 119.064		
Плотность смеси газов					
	ρ _{см} := $\frac{[(p1 \cdot c1) + (p2 \cdot c2) + (p3 \cdot c3) + (p4 \cdot c4) + (p5 \cdot c5) + (p6 \cdot c6) + (p7 \cdot c7) + (p8 \cdot c8)]}{100} = 0.752$				
плотность газовой смеси по отношению к воздуху определяется					
	S := $\frac{\rho_{см}}{\rho_{в}} = \frac{0.752}{1.293} = 0.582$	ρ _в := 1.293			
	N _{см} := 22.4 · ρ _{см} = 16.848				
	v := $8.525 \times 10^{-5} + 0.752 = 1.134 \times 10^{-4}$ m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7 + m8 = 8.525×10^{-5}				
относительная влажность выражается					
	RH _{2O} := 2.338 kPa при 20 градусах парциальное давление H _{2O}				
Если рассматривать смесь газов заполняющих объем V при температуре T тогда парциальное давление можно найти как					
	T := 293 R := 452.271				
	P1 := (p1 + mm1) · R · T = 5.388×10^3 P4 := (p4 + mm4) · R · T = 5.688×10^3 P7 := (p7 + mm8) · R · T = 7.115×10^3				
	P2 := (p2 + mm2) · R · T = 5.553×10^3 P5 := (p5 + mm5) · R · T = 5.83×10^3 P8 := (p8 + mm8) · R · T = 5.56×10^3				
	P3 := (p3 + mm3) · R · T = 5.589×10^3 P6 := (p6 + mm6) · R · T = 5.487×10^3				
	φ := $\frac{\rho_{см}}{\rho_{H2O}} \cdot 100 = 2.33 \times 10^7$ ρ _{см} := (P1 · x1 + P2 · x2 + P3 · x3 + P4 · x4 + P5 · x5 + P6 · x6 + P7 · x7 + P8 · x8) · 100 = 5.447×10^5				

Теплота сгорания газов

Значение высшей точки теплоты сгорания взяты из ГО СТ 30319.1-96 таблица 2

Данные по изобарной теплоемкости взяты из ГОСТА

30319 3-2015 таблица 4

$$Q_{в1} := 37.044 \cdot c_1 = 3.388 \times 10^3 \quad c_p := 12.25 \quad r := 2.51 \text{ мдж} \quad mh_{20} := 2.51 \cdot 10^6$$

$$Q_{в2} := 64.91 \cdot c_2 = 153.188$$

$$Q_{в3} := 92.29 \cdot c_3 = 36.916$$

$$Q_{в4} := 119.7 \cdot c_4 = 25.137$$

$$Q_{в5} := 147 \cdot c_5 = 73.5$$

$$Q_{в6} := 12.63 \cdot c_6 = 3.789$$

$$Q_{в7} := 23.37 \cdot c_7 = 65.436$$

$$Q_{всм} := Q_{в1} + Q_{в2} + Q_{в3} + Q_{в4} + Q_{в5} + Q_{в6} + Q_{в7} = 3.746 \times 10^3$$

$$Q := Q_{всм} - mh_{20} \cdot [r + c_p \cdot (t_s - t_k)]$$

$$Q := Q_{всм} - 2.51 \cdot [2.51 + 12.25(20 - 0)] = 3.125 \times 10^3$$

$$Q_{нсм} := 0.01 \left(\sum_1^n r_i \right)$$

$$Q_{н1} := 37.04 \cdot c_1 = 3.388 \times 10^3 \quad Q_{н5} := 146.8 \cdot c_5 = 73.4$$

$$Q_{н2} := 64.91 \cdot c_2 = 153.188 \quad Q_{н6} := 12.63 \cdot c_6 = 3.789$$

$$Q_{н3} := 92.29 \cdot c_3 = 36.916 \quad Q_{н7} := 12.63 \cdot c_7 = 35.364$$

$$Q_{н4} := 119.7 \cdot c_4 = 25.137 \quad Q_{н8} := 23.37 \cdot c_8 = 46.039$$

$$Q_{нсм} := Q_{н1} + Q_{н2} + Q_{н3} + Q_{н4} + Q_{н5} + Q_{н6} + Q_{н7} + Q_{н8} = 3.762 \times 10^3$$

Вычислить теоритический объем воздуха

$$V_0 := (1 + 20.9) \cdot \left[\sum (V_{oi} \cdot r_i) \right]$$

объемы газа в м³

$$V_1 := (1000 \cdot x_1) = 914.6 \quad V_8 := 1000 \cdot x_8 = 19.7$$

$$V_2 := 1000 \cdot x_2 = 23.6$$

$$V_3 := 1000 \cdot x_3 = 4$$

$$V_4 := 1000 \cdot x_4 = 2.1$$

$$V_5 := 1000 \cdot x_5 = 5$$

$$V_6 := 1000 \cdot x_6 = 3$$

$$V_7 := 1000 \cdot x_7 = 28 \quad V_{см} := (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8) \div 20.9 = 47.847$$

$$G_{\text{CH}_4} := \frac{\text{mm1} \cdot V1 \cdot x1}{22.4} = 613.553 \quad G_{\text{C}_5\text{H}_{12}} := \frac{\text{mm5} \cdot V5 \cdot x5}{22.4} = 0.081$$

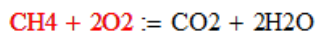
$$G_{\text{C}_2\text{H}_6} := \frac{\text{mm2} \cdot V2 \cdot x2}{22.4} = 0.748 \quad G_{\text{N}_2} := \frac{\text{mm6} \cdot V6 \cdot x6}{22.4} = 0.011$$

$$G_{\text{C}_3\text{H}_8} := \frac{\text{mm3} \cdot V3 \cdot x3}{22.4} = 0.031 \quad G_{\text{CO}_2} := \frac{\text{mm7} \cdot V7 \cdot x7}{22.4} = 1.54$$

$$G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} := \frac{\text{mm4} \cdot V4 \cdot x4}{22.4} = 0.011 \quad G_{\text{H}_2\text{S}} := \frac{\text{mm8} \cdot V8 \cdot x8}{22.4} = 0.59$$

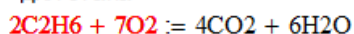
$$G_{\text{об}} := G_{\text{CH}_4} + G_{\text{C}_2\text{H}_6} + G_{\text{C}_3\text{H}_8} + G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + G_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + G_{\text{N}_2} + G_{\text{CO}_2} + G_{\text{H}_2\text{S}} = 616.566$$

для метана



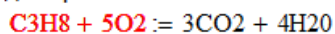
$$V01 := 2$$

для этана



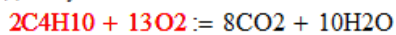
$$V02 := 3.5$$

для пропана

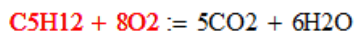


$$V03 := 5$$

для бутана

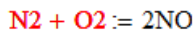


$$V04 := 6.5$$



$$V05 := 8$$

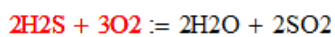
для азота



$$V06 := 1$$

$$V07 := 1$$

для сероводорода



$$V08 := 1.5$$

$$V0 := (1 + 20.9) \cdot \left[\sum_{i=1}^8 (Voi \cdot ri) \right]$$

$$V0 := (1 + 20.9)(V01 \cdot c1 + V02 \cdot c2 + V03 \cdot c3 + V04 \cdot c4 + V05 \cdot c5 + V06 \cdot c6 + V07 \cdot c7 + V08 \cdot c8) = 9.789$$

теоретическую температуру горения можно вычислить по формуле получаемой из уравнения теплового баланса точки

для расчета теоретической температуры горения T_g запишем уравнение теплового баланса

$$T_g := \frac{Q_{нсм}}{v1 \cdot c1 + v2 \cdot c2} \quad C_{рсм} := (0.76 \cdot c1 + 4.33 \cdot c2 + 6.6 \cdot c3 + 9.44 \cdot c4 + 11.76 \cdot c5 + 0.137 \cdot c6 + 2.044 \cdot c7 + 1.051 \cdot c8) \div 8 = 12.258$$

$$T_n := 293 \quad T_g := \frac{Q_{нсм}}{V_{см} \cdot C_{рсм} \cdot 10^{-3}} = 6.413 \times 10^3$$

$$Q_{tt} := V_{см} \cdot c_p \cdot (T_g - T_n) = 3.587 \times 10^6$$

Удельный объем относительная плотность

$$V_{уд} := \frac{1}{\rho_{см}} = 1.33 \quad \rho_{воз} := 1.22 \quad \Delta := \frac{\rho_{см}}{\rho_{воз}} = 0.616$$

постоянные Коэффициента Антуана взяты из пособия к НПБ 105-95 приложение 2

$$C_{ка1} := 264.804 \quad C_{ка2} := \quad C_{ка3} := 248.116 \quad C_{ка4} := 242.555$$

$$C_{ка5} := 233.493 \quad C_{ка6} := \quad C_{ка7} := \quad C_{ка8} :=$$

$$C := (C_{ка1} + C_{ка3} + C_{ка4} + C_{ка5}) \div 4 = 247.242$$

η_0 динамическая вязкость при 273 К

$$\eta_1 := 1028 \quad \eta_2 := 1223 \quad \eta_3 := 750 \quad \eta_4 := 689 \quad \eta_5 := 623 \quad \eta_6 := 1665 \quad \eta_7 := 1367 \quad \eta_8 := 1179$$

$$\eta_0 := (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8) \div 10^8 = 8.524 \times 10^{-5}$$

Зависимость динамической вязкости

$$\eta := \left[\eta_0 \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \right] \cdot \frac{(273 + C)}{(T + C)} = 9.127 \times 10^{-5}$$

Удельная теплоемкость

$$C_T := \frac{Q_{tt}}{T \cdot G_{об}} = 19.857$$

$$U := \left(\frac{17}{2}\right) \cdot \rho_{см} \cdot V_{см} = 305.89$$

$$C_v := \frac{U}{T} = 1.044$$

$$R_{см} := \frac{8314.3}{mm1 \cdot x1 + mm2 \cdot x2 + mm3 \cdot x3 + mm4 \cdot x4 + mm5 \cdot x5 + mm6 \cdot x6 + mm7 \cdot x7 + mm8 \cdot x8} = 452.271$$

$$C_p := C_v + R_{см} = 453.315$$

$$P := \rho_{см} \cdot V_{см} = 35.987$$

Коэффициент Джоуля-Томсона

$$D := \frac{T}{P} = 8.142$$

объемные доли

$$v_{i1} := \frac{V1}{V_{см}} = 19.115 \quad v_{i2} := \frac{V2}{V_{см}} = 0.493 \quad v_{i3} := \frac{V3}{V_{см}} = 0.084 \quad v_{i4} := \frac{V4}{V_{см}} = 0.044$$

$$v_{i5} := \frac{V5}{V_{см}} = 0.105 \quad v_{i6} := \frac{V6}{V_{см}} = 0.063 \quad v_{i7} := \frac{V7}{V_{см}} = 0.585 \quad v_{i8} := \frac{V8}{V_{см}} = 0.412$$

$$v_{см} := v_{i1} + v_{i2} + v_{i3} + v_{i4} + v_{i5} + v_{i6} + v_{i7} + v_{i8} = 20.9$$

$$mm_{см} := mm1 + mm2 + mm3 + mm4 + mm5 + mm6 + mm7 + mm8 = 326.975$$

молярные доли

$$y_{i1} := \frac{mm1}{mm_{см}} = 0.05 \quad y_{i2} := \frac{mm2}{mm_{см}} = 0.092 \quad y_{i3} := \frac{mm3}{mm_{см}} = 0.135 \quad y_{i4} := \frac{mm4}{mm_{см}} = 0.178$$

$$y_{i5} := \frac{mm5}{mm_{см}} = 0.221 \quad y_{i6} := \frac{mm6}{mm_{см}} = 0.086 \quad y_{i7} := \frac{mm7}{mm_{см}} = 0.135 \quad y_{i8} := \frac{mm8}{mm_{см}} = 0.104$$

$$y_{\text{см}} := y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + y_{i4} + y_{i5} + y_{i6} + y_{i7} + y_{i8} = 1$$

Плотность газовой смеси при нормальных условиях

$$\rho_{\text{н}} := (v_{i1} \cdot y_{i1} + v_{i2} \cdot y_{i2} + v_{i3} \cdot y_{i3} + v_{i4} \cdot y_{i4} + v_{i5} \cdot y_{i5} + v_{i6} \cdot y_{i6} + v_{i7} \cdot y_{i7} + v_{i8} \cdot y_{i8}) \div 22.42 = 0.059$$

Динамическая вязкость газовой смеси

$$\eta_{11} := v_{i1} \cdot \eta_1 = 1.965 \times 10^4 \quad \eta_{51} := v_{i5} \cdot \eta_5 = 65.103$$

$$\eta_{21} := v_{i2} \cdot \eta_2 = 603.233 \quad \eta_{61} := v_{i6} \cdot \eta_6 = 104.395$$

$$\eta_{31} := v_{i3} \cdot \eta_3 = 62.7 \quad \eta_{71} := v_{i7} \cdot \eta_7 = 799.968$$

$$\eta_{41} := v_{i4} \cdot \eta_4 = 30.24 \quad \eta_{81} := v_{i8} \cdot \eta_8 = 485.43$$

Теплоемкость

$$c_{i1} := 2483 \quad c_{i5} := 2345$$

$$c_{i2} := 3622 \quad c_{i6} := 1039$$

$$c_{i3} := 2650 \quad c_{i7} := 826$$

$$c_{i4} := 2424 \quad c_{i8} := 1026$$

$$C_{\text{см}} := y_{i1} \cdot c_{i1} + y_{i2} \cdot c_{i2} + y_{i3} \cdot c_{i3} + y_{i4} \cdot c_{i4} + y_{i5} \cdot c_{i5} + y_{i6} \cdot c_{i6} + y_{i7} \cdot c_{i7} + y_{i8} \cdot c_{i8} = 2.071 \times 10^3$$

уравнение Клаперона с добавлением коэффициента сжимаемости

$$z := \frac{P \cdot 10^3}{(\rho_{\text{см}} \cdot R_{\text{см}} \cdot T_{\text{к}})} = 0.889$$

приведенные температура и давление

$$a := 0.000831$$

$$T_{\text{кр}} := (355.1 + 0.97 \cdot a) - (0.00049 \cdot a^2) = 355.101$$

критическое давление определено по графику 6 на 20 странице книги Сарданашвили

$$P_{\text{кр}} := 0.5 \cdot 10^6$$

$$T_{\text{пр}} := \frac{T}{T_{\text{кр}}} = 0.825$$

$$P_{гр} := \frac{P_{см}}{P_{кр}} = 1.089$$

коэффициент сжимаемости z

$$z_1 := 1 - (0.4273 \cdot T_{гр}^{-3.668} \cdot P_{гр}) = 0.058$$

Плотность жидкого компонента

$$p_{ж1} := v_{i1} \cdot p_1 = 12.769 \quad p_{ж5} := v_{i5} \cdot p_5 = 0.332$$

$$p_{ж2} := v_{i2} \cdot p_2 = 0.621 \quad p_{ж6} := v_{i6} \cdot p_6 = 0.073$$

$$p_{ж3} := v_{i3} \cdot p_3 = 0.155 \quad p_{ж7} := v_{i7} \cdot p_7 = 1.071$$

$$p_{ж4} := v_{i4} \cdot p_4 = 0.11 \quad p_{ж8} := v_{i8} \cdot p_8 = 0.589 \quad p_{ж} := p_{ж1} + p_{ж2} + p_{ж3} + p_{ж4} + p_{ж5} + p_{ж6} + p_{ж7} + p_{ж8} = 15.72$$

Плотность газообразного продукта

$$p_{г1} := \frac{mm1 \cdot x_1}{24.04} = 0.62 \quad p_{г2} := \frac{mm2 \cdot x_2}{24.04} = 0.03 \quad p_{г3} := \frac{mm3 \cdot x_3}{24.04} = 7.337 \times 10^{-3} \quad p_{г4} := \frac{mm4 \cdot x_4}{24.04} = 5.077 \times 10^{-3}$$

$$p_{г5} := \frac{mm5 \cdot x_5}{24.04} = 0.01 \quad p_{г6} := \frac{mm6 \cdot x_6}{24.04} = 3.496 \quad p_{г7} := \frac{mm7 \cdot x_7}{24.04} = 0.051 \quad p_{г8} := \frac{mm8 \cdot x_8}{24.04} = 0.028$$

$$p_{г} := p_{г1} + p_{г2} + p_{г3} + p_{г4} + p_{г5} + p_{г6} + p_{г7} + p_{г8} = 0.765$$

Динамическая вязкость жидкого продукта

$$\mu_{ж} := \left[326.975 \cdot \left(\eta_0 \cdot 10^{-6} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 2.98 \times 10^{-3} \quad t := 22$$

$$\sigma := \left(\frac{4.24 \cdot mw}{100000} \right) + \left(\frac{6.82}{1000} \right) = 7.63 \times 10^{-3}$$

$$\tau := \left(\frac{1.02 \cdot mw^{1.87}}{1000000} \right) + \left(\frac{5.48}{1000} \right) = 5.734 \times 10^{-3}$$

$$\mu_{жтп} := \left[\mu_{ж} \cdot e^{[\sigma \cdot (P-0.101)]} \right] \div \left[e^{[\tau \cdot (t-20)]} \right] = 3.874 \times 10^{-3}$$

$$\sigma \cdot (P - 0.101) = 0.274$$

$$\tau \cdot (t - 20) = 0.011$$

Динамическая вязкость газообразного продукта

$$K_y := \left[(9.41 + 0.02 \cdot mw) \cdot \left[1.8 \cdot \left(T + \frac{273}{15} \right) \right]^{1.5} \right] \cdot \frac{10^{-4}}{\left[209 + 19 \cdot mw + 1.8 \cdot \left(T + \frac{273}{15} \right) \right]} = 0.011$$

$$X := 3.5 + \left[\frac{986}{1.8 \cdot \left(T + \frac{273}{15} \right)} \right] + 0.01 \cdot mw = 5.451$$

$$y := 2.4 - 0.2 \cdot X = 1.31$$

$$\mu_{рг} := K_y \cdot e^{\left(\frac{рг}{10^3} \right)^y} = 0.011$$

Кинематическая вязкость жидкого и газообразного продукта

$$\nu_{ж} := \frac{\mu_{жтп}}{\rho_{ж}} = 2.464 \times 10^{-4}$$

$$\nu_{г} := \frac{\mu_{рг}}{\rho_{г}} = 0.015$$

Поверхностное натяжение жидкости определяется в зависимости от ее плотности

$$\sigma_{ж} := (0.0532 \cdot \rho_{ж} - 15.5) \cdot (1.056 - 0.0028 \cdot t) \cdot \left[0.0000199 \cdot (P \cdot 9.81)^2 \right] - 0.0081 \cdot (P \cdot 9.81) + 0.9668 = -38.058$$

Температура застывания и помутнения жидких продуктов определяется по формулам t_n и t_z определит по госту ГОСТ Р 56718-2015

$$n_z := 8 \quad t_z := 258 \quad t_{ziz} := -247.744 \quad t_n := -60 + 273 = 213 \quad t_{znp} := 249.897$$

$$(t_z + 273.15) := [V_{icm} \cdot (t_{ziz} + 273.15)]$$

$$t_z + 273.15 = 531.15$$

$$20.9 \cdot t_{ziz} + 20.9 \cdot 273.15$$

$$20.9 \cdot 273.15 = 5.709 \times 10^3$$

$$(531.15 - 5.709 \cdot 10^3) \div 20.9 = -247.744$$

$$(t_n + 273.15) := V_{icm} \cdot (t_{znp} + 273.15)$$

$$t_n + 273.15 = 486.15$$

$$(486.15 - 5.709 \cdot 10^3) \div 20.9 = -249.897$$

Октановое число автобензинов без высокооктановых присадок сжиженных газов

$$O_{i1} := 110 \quad O_{i2} := 108 \quad O_{i3} := 105 \quad O_{i4} := 94 \quad O_{i5} := 70 \quad O_{i6} := 100$$

$$O_i := O_{i1} \cdot x_1 + O_{i1} \cdot x_2 + O_{i1} \cdot x_3 + O_{i1} \cdot x_4 + O_{i1} \cdot x_5 + O_{i6} \cdot x_6 = 104.723$$

Константы b_i и T_{bi} для нормальных парафинов

$$b_i := \log((1.9399 + 0.6446 \cdot 1.28)) = 0.442$$

$$T_{bi} := \log(1.8298 + 2.4583 \cdot 0.107) = 0.321$$

Коэффициента А F В

$$A_K := (6.1 \cdot 10^{-5} \cdot P^3 + 1.86 \cdot 10^{-3} \cdot P^2) - (4.89 \cdot 10^{-2} \cdot P + 1.0049) = 2.487$$

$$B_K := (1.79 \cdot 10^{-4} \cdot P^3) - (5.16 \cdot 10^{-3} \cdot P + 12.59 \cdot 10^{-2} \cdot P + 1.0127) = 2.613$$

$$F_i := b_i \cdot \left(\frac{1}{T_{bi}} \right) - \left(\left(\frac{1}{273.15 + t} \right) \right) = 1.374$$

Константу фазового равновесия компонентов определяется в зависимости от давления

$$K_i := \left(\frac{1}{P_{см}} \right) \cdot 10^{(A_K \cdot F_i) + B_K} = 1.967$$

Состав равновесного пара выделяющая из состава Z

$$e := 0.154528$$

$$Y_i := 100 \cdot \left[\left(\frac{mw}{100} \right) \cdot \left[\frac{K_i}{1 + (K_i - 1) \cdot e} \right] \right] = 32.68$$

$$X_i := \frac{Y_i}{K_i} = 16.618$$

После этого можно определять свойства потоков по вышеприведенным уравнениям задавая для пара $Z_i=Y_i$ и $Z_i=X_i$ для жидкости. После расчета мопекулярных масс пара и жидкости можно определить массовую долю отгона пара g которую необходимо знать для расчета мат баланса процесса

$$g_i := \frac{e \cdot Y_i}{e \cdot Y_i + (1 - e) \cdot X_i} = 0.264$$

Константа псевдоравновесия можно рассчитать

$$K_i^a := K_i$$

Эквивалентная критическая плотность

$$T_K := (111.3 \cdot x_1) + (184.4 \cdot x_2) + (230.9 \cdot x_3) + (272.5 \cdot x_4) + (309.1 \cdot x_5) + (77.4 \cdot x_6) + (194.54 \cdot x_7) + (213 \cdot x_8) = 119.064$$

$$D_{кр} := (95.26 - 0.242 \cdot T_K + 338.54 \cdot p_{см}) \div mw = 16.81$$

Определение метанового числа

$$mч1 := 96.245 \quad mч3 := 0.045 \quad mч4 := 0.0067 \quad mч6 := 0.275 \quad mч7 := 0.42$$

$$mч2 := 2.94 \quad mч5 := 0.0029$$

$$mч := (mч1 \cdot x_1 + mч2 \cdot x_2 + mч3 \cdot x_3 + mч4 \cdot x_4 + mч5 \cdot x_5 + mч6 \cdot x_6 + mч7 \cdot x_7) - 1.97\% = 88.088$$

Выводы (Conclusions)

В этом расчете мы ознакомились с методом расчета предпроектных данных важнейшего для расчета будущих работ. В этом расчете мы рассчитали такие важнейшие значения как плотность, вязкость, эффект Джоуля Томпсона, газовые смеси, уравнения состояния газа, приведенные давления и температуры, плотность жидкого газообразного продукта, динамическую вязкость жидкого продукта, поверхностное натяжение жидкости, температуру застывания и помутнения, температуру горения, октановое число, константу фазового равновесия, октановое число. Тем самым мы рассчитали предпроектные исследования газоконденсатных систем

Conclusions

In this calculation, we got acquainted with the method of calculating pre-project data, which is the most important for calculating future work. In this calculation, we calculated such important values as density, viscosity, Joule Thompson effect, gas

mixtures, equations of state of a gas, reduced pressures and temperatures, density of a liquid gaseous product, dynamic viscosity of a liquid product, surface tension of a liquid, pour and cloud point, combustion temperature, octane number, phase equilibrium constant, octane number. Thus, we calculated the pre-project studies of gas condensate systems

Список использованной литературы

- 1 ФЗ Российской Федерации от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях безопасности».
- 2 Газовые и газоконденсатные месторождения/В.Г.Васильев, В.И Ермаков, И.П Жабрев, и др Под ред И.П Жабрева. 2-ое издание., перераб, и доп. М., Недра, 1983. 375 с
- 3 Таблицы физических величин. Справочник Под ред акад И.К Кикоина. М.:Атомиздат, 1976-1008 с
- 4 Кемалов Алим Фейзрахманович Кемалов Руслан Алимович Учебное пособие ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ Предпроектные исследования газоконденсатных систем 2022