

UDC 665.723

**STUDY OF SUPERSONIC SEPARATION OF ASSOCIATED
PETROLEUM GAS USING UNISIM DESIGN R400**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОЙ СЕПАРАЦИИ
ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА С ПОМОЩЬЮ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА UNISIM DESIGN R400**

D. A. Salikaev, O. A. Gumerov

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation**

Саликаев Д. А., Гумеров О. А.

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

e-mail: salikaevd@mail.ru

Abstract. Utilization and use of associated petroleum gas is an important task of oil and gas companies. Therefore, the use of low-cost and effective technology solutions will enable oil companies to increase the utilization of associated petroleum gas. One of the methods of development of associated petroleum gas treatment technology is the use of low-temperature supersonic gas-dynamic separation.

That technology based on the passage of gas stream through supersonic nozzle. The adiabatic gas expansion results in deep gas cooling due to heat energy of gas transforms into stream kinetic energy. When gas stream direction changes condensed components are dropped to the inner wall and removed by centrifugal force.

Valuable components recovery (C_3+) and meeting hydrocarbon dew point and water dew point temperatures of transported gas are the main ways to use

supersonic technology today.

The article discusses the effects of inlet stream pressure and temperature changing, pressure drop through the separation device changing and the composition of the stream changing on supersonic separation. Study has been conducted using UniSim Design R400 software.

Knowing the nature of process parameters impact on process outcome it is possible to predict products quantity and quality and the applicability of the process with some accuracy. Simulation allows to adapt design facilities of device to specific conditions of gas purification and drying process, also it becomes possible to optimize process parameters for sufficient gas components production.

Аннотация. Утилизация и использование попутного нефтяного газа является важной задачей нефтегазодобывающих предприятий. Применение низкочастотных и эффективных технологических решений позволит предприятиям нефтедобывающей отрасли повысить степень использования попутного нефтяного газа. Одним из направлений развития технологий подготовки попутного нефтяного газа является применение так называемой сверхзвуковой низкотемпературной газодинамической сепарации.

Данная технология основана на прохождении потока газа через сверхзвуковые сопла. При адиабатическом расширении газа происходит сильное охлаждение за счет перехода тепловой энергии газа в кинетическую энергию потока. При изменении направления движения, сконденсированные компоненты за счет центробежной силы отбрасываются к стенкам аппарата, где и отбираются.

В настоящее время основными направлениями применения процесса сверхзвуковой сепарации газа являются извлечение целевых компонентов (C_3+) из попутных нефтяных газов и обеспечение требуемого качества подготовки. В статье рассматривается влияние на процесс сверхзвуковой сепарации углеводородного газа таких параметров, как состав газа,

давление, температура потока во входном устройстве, перепад давления в устройстве. Анализ влияния этих параметров на процесс сверхзвуковой сепарации проведен с помощью программного комплекса UniSim Design R400..

Обладая сведениями о характере воздействия тех или иных параметров процесса сверхзвуковой сепарации углеводородных газов на результат процесса, можно с определенной точностью прогнозировать изменение качественных и количественных характеристик продуктов, определять границы применимости процесса. Моделирование позволяет адаптировать конструктивные особенности оборудования к конкретным условиям проведения процесса осушки и очистки попутного нефтяного газа, а также позволит оптимизировать технологические параметры процесса с достаточным выходом компонентов газа.

Key words: supersonic separation, supersonic nozzle, low-temperature separation, turboexpander, desired components extraction, dew point temperature, decompression.

Ключевые слова: сверхзвуковая сепарация, сверхзвуковое сопло, низкотемпературная сепарация, турбодетандер, извлечение целевых компонентов, температура точки росы, декомпрессия.

Most of the technologies for the separation of gas components and recovering the desired fractions, based on the use of low-temperature processes in which the temperature reduction due to the condensation and subsequent extraction of gas components.

Significant impact on the efficiency of the separation process has a choice of a way of cooling gas. Typically, cooling is made by the cooling units, combined with recuperative heat exchangers. In a separation system for processing large volumes of gas (more than 1 billion N m³/year), mainly used to cool the throttle valve, turbo-expander unit or chiller. Depending on the desired degree of

extraction of the desired fractions using either one of these devices, or a combination there of.

Using refrigerators turbines and associated not only with a substantial increase in capital and operating costs, but in many cases their usage is impossible due to the nature of their operations. For example, the usage of these aggregates in many offshore platforms is problematic because of the necessity of constant maintenance but in perspective a part of subsea production systems their usage is impossible.

Application of 3S-technology allows, in many cases, eliminate the usage of refrigeration machines and turbines, while improving operational and economic characteristics of the objects.

The developer and the licensor of the technology is Trans Lang Technologies Ltd. Company – TLT (Canada). The technology is patented in Russia, USA, Canada, Europe, Asia, South America and others.

Technology of supersonic gas separation materials found a wide commercial usage as a part of ground gas processing complexes in the composition of installations for gas treatment on offshore platforms is also possible to use the technology in subsurface conditions.

Today 3S-separators operate on objects, which are presented below:

- Gubkinskoye GPP OJSC "RN-Purneftegaz" (Russia);
- North-Komsomolsk GPP OJSC "RN-Purneftegaz" (Russia);
- GPP №1 and №2 Talimu field (China);
- Gas Processing Plant "Okoloma", Shell Petroleum Development Company (Nigeria);
- Offshore platform B11, Petronas / SSB (Malaysia);
- Mine Canapu, Petrobras (Brazil) [1, 3, 4].

The main element of the technology is the supersonic 3S-separator (from English - Supersonic separator), which allows to realize the gas velocity above the velocity of sound in a gaseous medium (i.e. Mach numbers greater than 1) [5]. This

acceleration allows us to achieve an intense condensation and separation of the desired fractions of the natural gas.

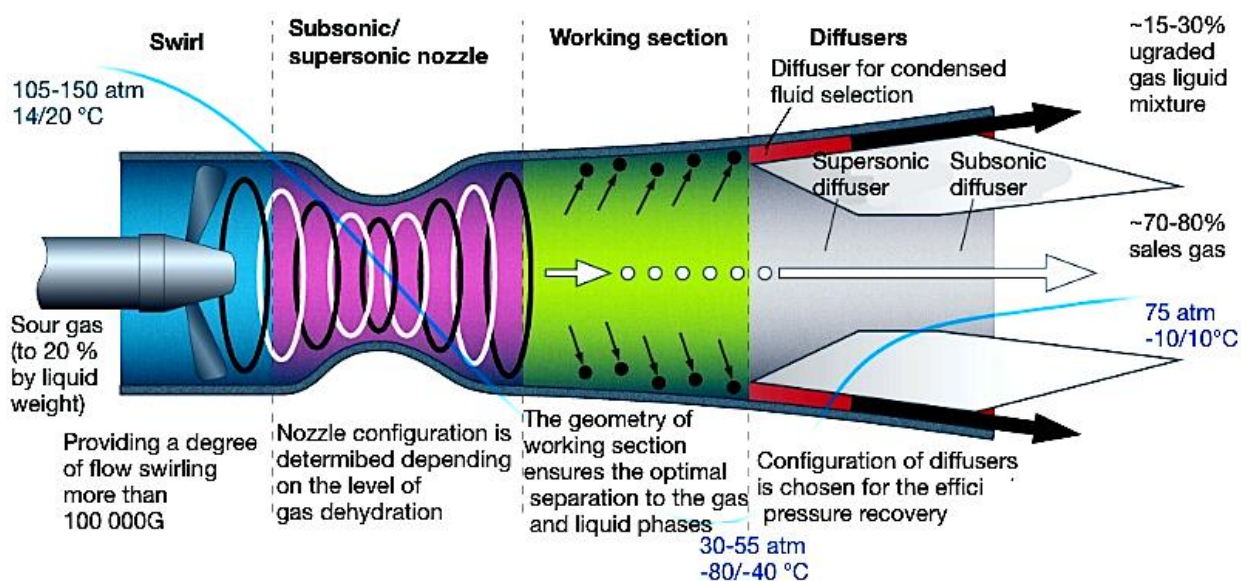


Figure 1. 3S-separator scheme

Inlet gas stream is twisted in the supersonic separator in the static swirler further in a supersonic Laval nozzle raw stream is accelerated to the velocity greater than the velocity of sound wave propagation in the medium inlet gas stream. As a result of the supersonic flow occurs gas conversion portion of the potential energy into kinetic energy, which leads to a strong cooling of gas. The cooled stream is directed into the working portion, wherein the desired fractions condense the natural gas and water. The produced drops move to the walls of the working part of 3S-separator by centrifugal forces due to rotation of the flow.

At the exit of the working part is formed by a central core stream purified from the desired fractions, and two-phase boundary layer near the wall, consisting of a liquid (water and hydrocarbons) and gas. Biphasic wall layer, separated from the core flow is directed into the diffuser slot shaped gas-liquid mixture, in which the braking of the flow occurs. The purified gas stream from the central core stream flows into the gas diffuser and also inhibited.

As a result of achieving supersonic velocities of gas flow can be implemented to $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature, so supersonic separator allows deep realizing of desired component from the natural gas [6, 7].

Distribution of values of the speed of the gas flow in the 3S-separator shown in Figure 2.

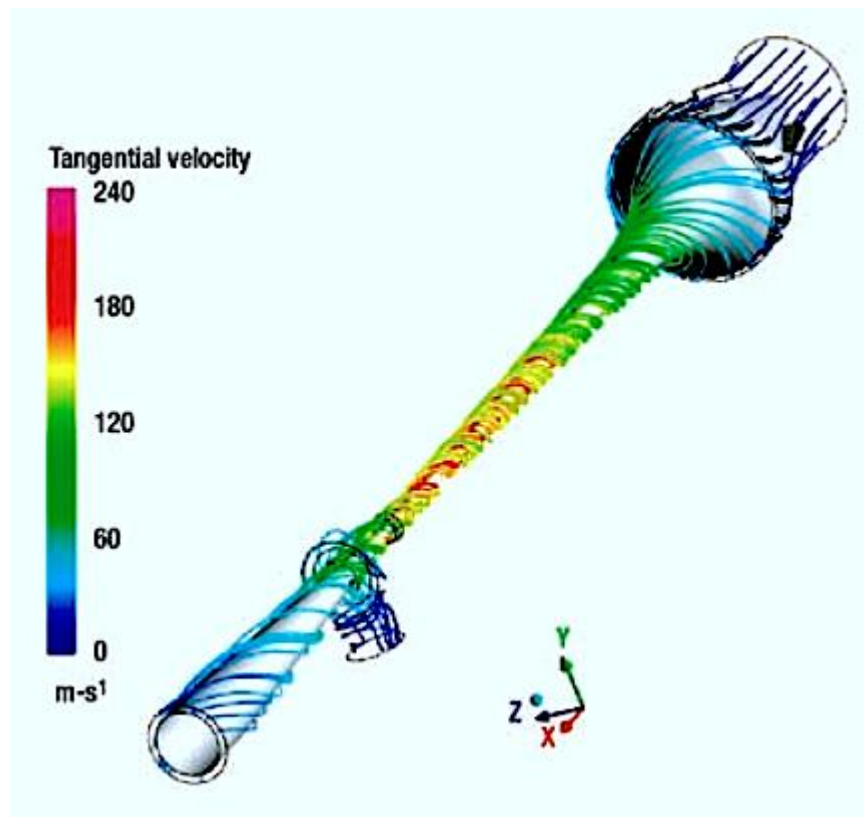


Figure 2. Distribution of the gas flow velocity in the 3S-separator

Low-temperature separation, 3S-based separation technology is used in gas treatment plants to transport (extract components heavier than pentane and C₅+ water), a systems used to extract heavier than methane hydrocarbons (ethane, propane, butane, etc.). Also, this method can be used to extract the acid components (CO₂, H₂S) from the hydrocarbon gas. According to various estimates, to date, about a third of the world's reserves of natural gas has a high content of acidic components, and this figure increases as the depletion of gas reserves with low content of acidic components. This fact is the reason for the growing interest in the supersonic separator, as the gas purification process of the acidic components [8, 9].

The main advantages of 3S-technology over other low-temperature separation processes are possible:

- The lack of dynamic elements in the design of the device, which causes reliability of the device;
- Simplicity of installation and operation;
- Low capital and operating costs;
- The relatively small size and metal installation;
- Ability to work 3S-separators in the presence of fluid in the inlet gas stream (which is absolutely unacceptable for the turbines);
- A broader range of operating parameters and feedstock composition compared with turbine expansion units;
- The ability of the device without supervision by the technological personnel, as well as subsea production systems;
- No need to use hydrate inhibitors, since the residence time of the raw material in the 3S - separator at low temperatures of hundredths of a second [1].

Modeling Process

In the course of this work carried out modeling of supersonic separation of a hydrocarbon gas, an approximate composition by passing in UniSim Design modeling environment. Subsequent study of the influence of process parameters on the process of extracting the target gas components and prepare to transport gas in accordance with the requirements.

Working environment simulation includes necessary raw material composite components to solve the problem, objects (material and energy flows, process equipment, controls and process control, logic operations) and utility.

As a package of thermodynamic equation for modeling Peng-Robinson's equation was chosen.

For 3S-separator simulation by a standard means UniSim Design, necessary to hold three physical processes taking place in the device:

- Expanding the raw materials gas stream and cooling;
- Separation of condensed liquid-gas flow on the gas and gas-liquid flows;
- Compression of the divided gas stream.

It is also necessary to make a reservation that the software environment provides the most accurate results in the simulation of equilibrium processes. As far as the process that takes place in a non-equilibrium supersonic separator, the method of modeling is considered as a first approximation to the real processes.

Schematically, the device for realization the method of supersonic separation is shown in Figure 3. Full mimic, resulting UniSim Design simulation means is shown in Figure 4.

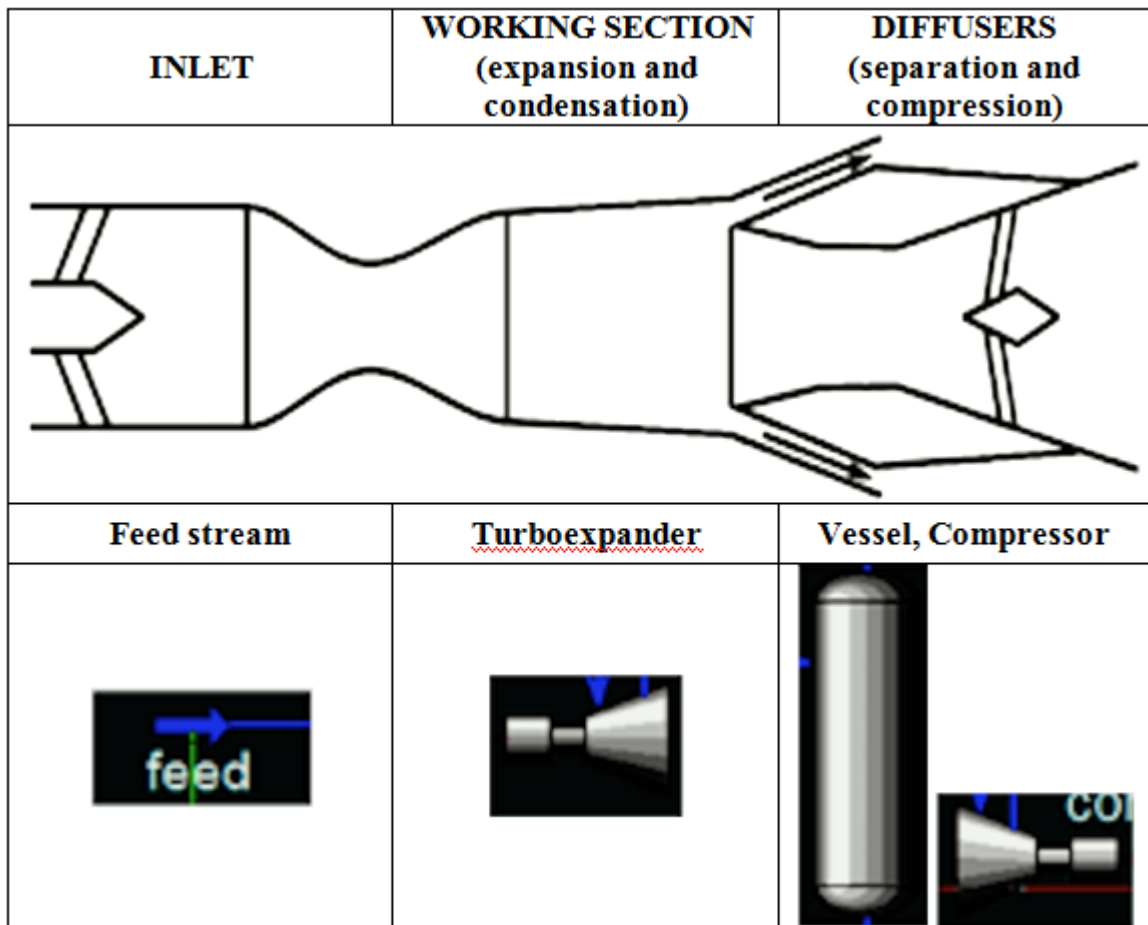


Figure 3. Schematic diagram of the modeling process 3S-separation

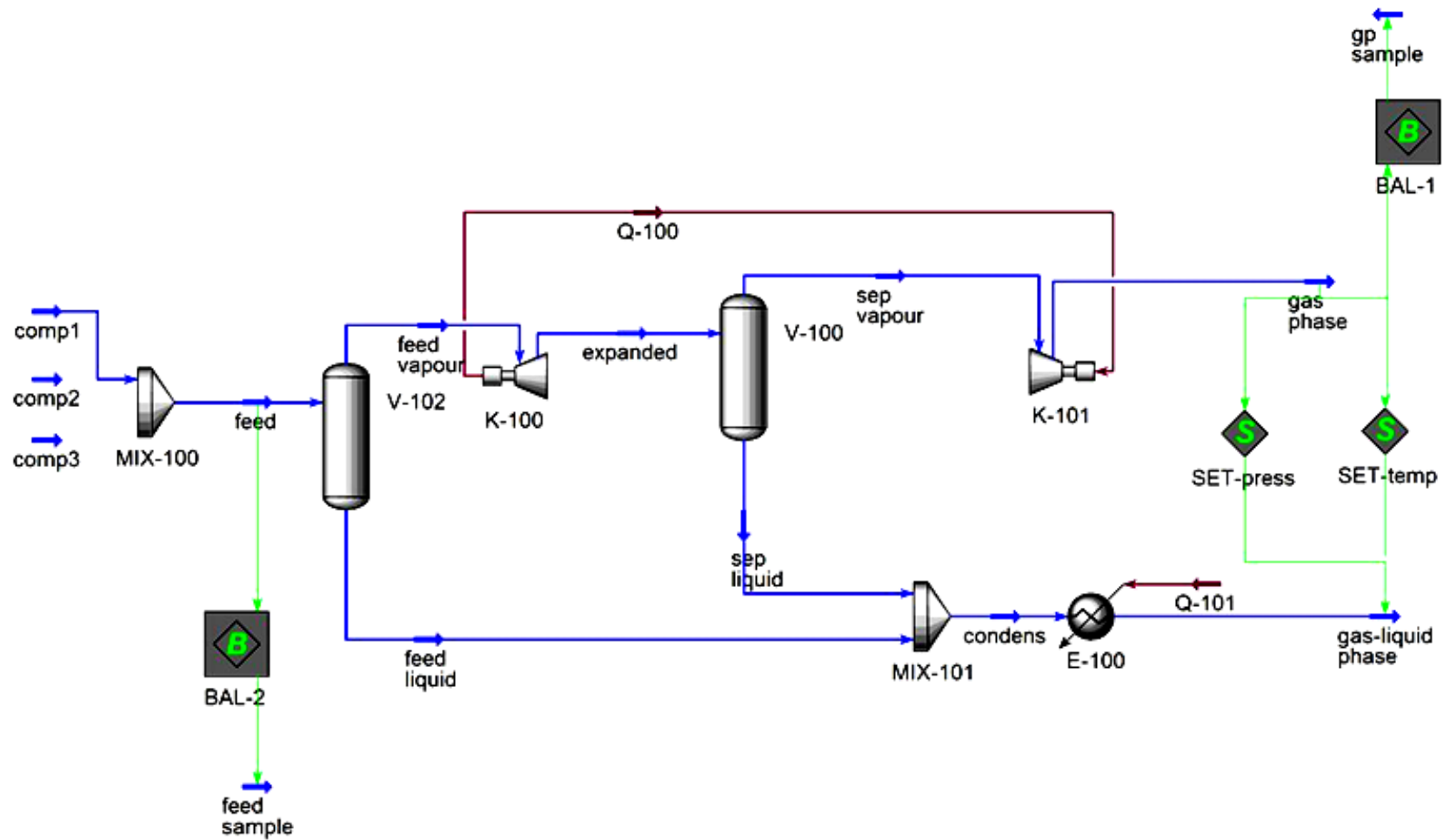


Figure 4. Mnemonic scheme of the process

The study was conducted for three different raw material stream compositions comp1, comp2, comp3, connected alternately into account; calorie (fat) and molecular weight were respectively increased.

As far as the working part of 3S-separator, in which the expansion of the gas is represented in the simulation turboexpander K-100, then fed to a turboexpander receiving feedstock (feed vapour) must not contain any liquid phase. For this purpose before the K-2 100 is mounted biphasе separator V-102. Thus, the processes occurring in the working of the supersonic separator in UniSim Design simulated environment through biphasе separator and turboexpander. The value of the differential pressure across the expansion turbine is set to 70% of the inlet pressure.

Holding the processes occurring in the 3S diffusers - separator (separation of gas-liquid and gas flows, a partial recovery of the initial flow pressure) UniSim Design means used biphasе separator V-100 with partial (15%) the transfer of the gas phase to the liquid flow, and compressor K-101, the work which is carried out by the expander generated K-100 Q-100 energy flow.

Supersonic separator products are available in two material streams - gas phase and gas-liquid phase. Characteristics of product flow (pressure and temperature), under the regime of 3S-separator, leads to the same values using logical operations SET-press and SET-temp.

The compositions of the raw material streams are presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of raw material flows

Component	comp1	comp2	comp3
CO ₂	0.0065	0.0200	0.0300
Nitrogen	0.0300	0.0250	0.0050
Methane	0.8602	0.8098	0.7800
Ethane	0.0500	0.0700	0.0800
Propane	0.0250	0.0300	0.0450
i-Butane	0.0060	0.0070	0.0090
n-Butane	0.0060	0.0100	0.0100
i-Pentane	0.0015	0.0040	0.0060
n-Pentane	0.0005	0.0030	0.0060
n-Hexane	0.0030	0.0050	0.0070
n-Heptane	0.0002	0.0010	0.0024
n-Octane	0.0000	0.0003	0.0005
n-Nonane	0.0000	0.0000	0.0001
Methyl mercaptane	0.0050	0.0070	0.0080
Ethyl mercaptane	0.0050	0.0070	0.0090
H ₂ S	0.0000	0.0000	0.0010
H ₂ O	0.0010	0.0010	0.0010
In total	1.00	1.00	1.00
Molecular weight	19.22	20.84	22.24

The effect of pressure on the extraction of target components

For each formulation studied the dependence of the raw materials stream extraction C₃₊ fraction (wt.%) in the condensed phase gas-liquid flow gas-liquid phase the pressure at the inlet of 3S-separator in the range of 60-100 bar increments of 10 bar and a temperature of +10 °C. Figure 5 shows graphics of the obtained dependences.

Obtained during research datas of dependence of extracting fraction from C₃₊ raw materials pressure leads to the conclusion that the target components extraction increases linearly within a predetermined pressure range.

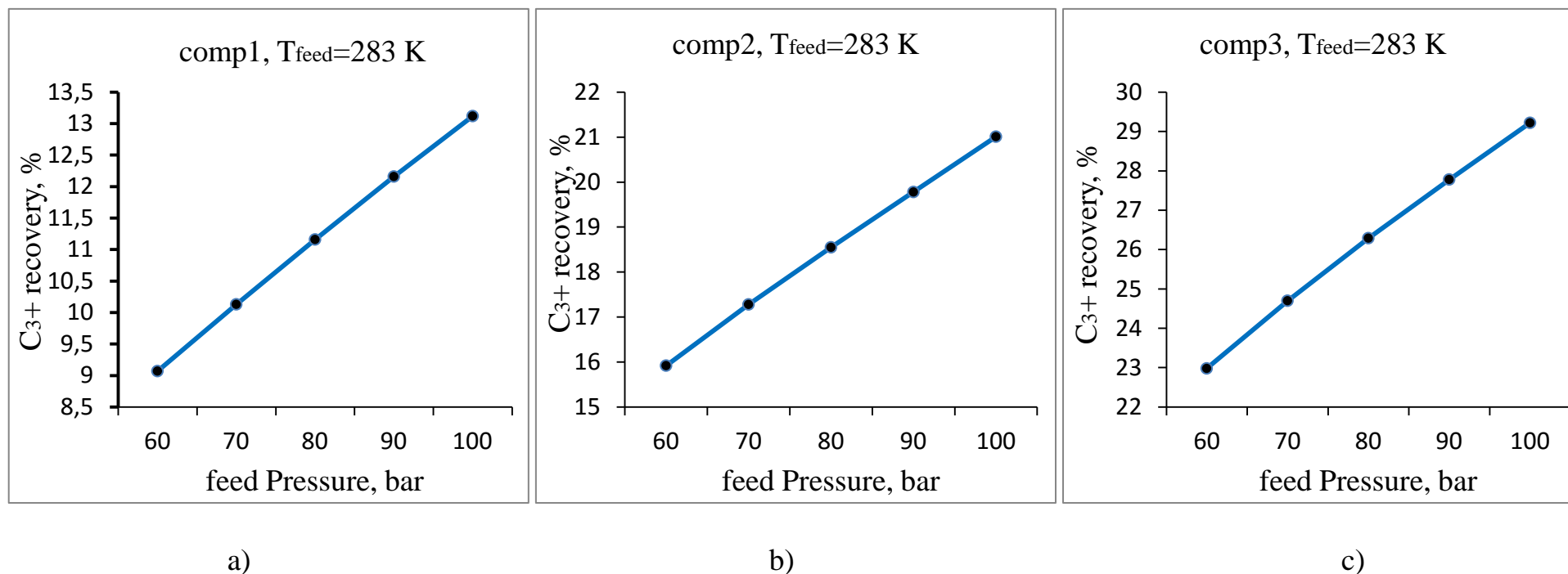


Figure 5. Dependence of the extraction of target components C_{3+} on the inlet pressure of the device for raw materials different composition at $T_{\text{feed}} = 100 \text{ K}$: a) comp1; b) comp2; c) comp3

The effect of temperature on the yield of target components

The results of the study of the dependence of extraction of the component C_{3+} in% by weight of the raw material stream inlet temperature at an inlet pressure of 100 bar in a device are shown in Figure 6.

For all the feed streamformulations (comp1, comp2, comp3) chart deviation from straightness insignificantly. It should also be noted that temperature impacts on liquid components production antisymbatic in contrast to the effect of pressure.

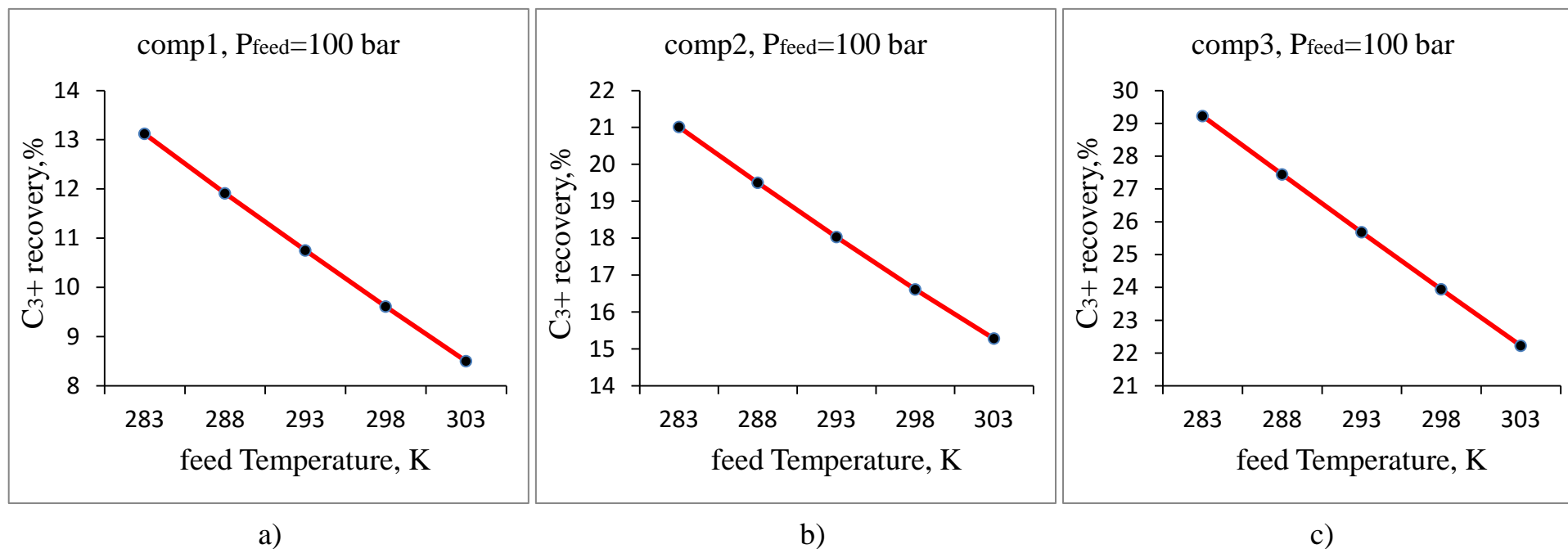


Figure 6. Dependence of the extraction of target components C₃₊ on the temperature of the raw materials different composition at P_{feed} = 100 bar: a) comp1; b) comp2; c) comp3

Influence of differential pressure 3S – separator to extract the target components

To achieve the desired reduction in temperature of the feedstock gas stream required acceleration to be achieved (determined by the device geometry) [8], and hence the pressure drop when passing gases through the working portion of 3S-separator.

The calculations of the degree of extraction of target components C_{3+} at various differential pressures. We consider all three compositions of hydrocarbon gas. The pressure at the inlet to the separator consistently and is 100 bar, the temperature of the raw material formulations comp1, comp2, comp3 is +20 °C. The calculation results are presented in graphical form (Figure 7).

According to the data presented in Figure 7, the degree of extraction of fraction C_{3+} for comp1 formulation is a linear function of the differential pressure in a supersonic separator's nozzle. With raw weighting (comp2, comp3) chart deviation from straightness is noticed. The more raw material molecular weight, the more chart deviation from straightness and «flattening».

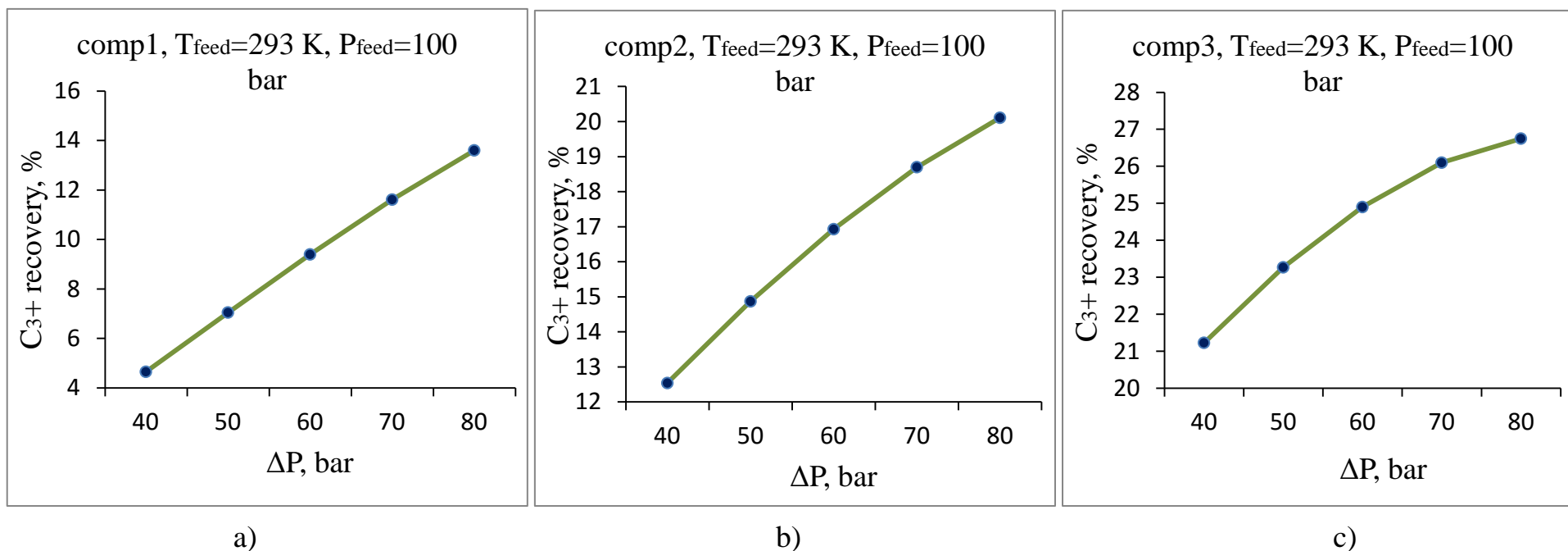


Figure 7. Dependence of the extraction of target components C₃₊ on the differential of pressure in the supersonic part of the separator of the raw materials different composition at T_{feed}=293 K, P_{feed}=100 bar: a) comp1; b) comp2; c) comp3

Effect of changes in raw material composition at the dew point temperature of the obtained product

One of the requirements for the gas in the drying and purification of [10], is the hydrocarbons dew point temperature (HCDP) and water dew point temperature (WDP). In the above cases, recycling of hypothetical compositions raw comp1, comp2, comp3 in the initial temperature ranges 0 to +20 °C and pressures of 60 - 100 bar in the gas phase part of the product water is absent, therefore WDP value is not defined. HCDP is determined by product composition and depends on the degree of separation of raw material.

To determine the dependence of the grass product from feed gas compositions were examined 3 modes programming model of the supersonic separator: Mode № 1 – the initial temperature and pressure, respectively, 0 °C and 100 bar; Mode № 2 – (+10 °C) and 80 bar; Mode № 3 – (+20 °C) and 60 bar. Software simulation results are shown in figure 8. Hydrocarbons dew point temperatures (in the charts - HCDP ordinate) are shown to the average value of the pressure in the gas main pipelines of 75 bar.

According to the results, when considered modes of supersonic separator, we can assume that HCDP temperature of product obtained from heavier raw material is higher than HCDP temperature of product obtained from lighter raw composition. Also it should be noted that raw material weighting leads to HCDP temperature increasing slows down.

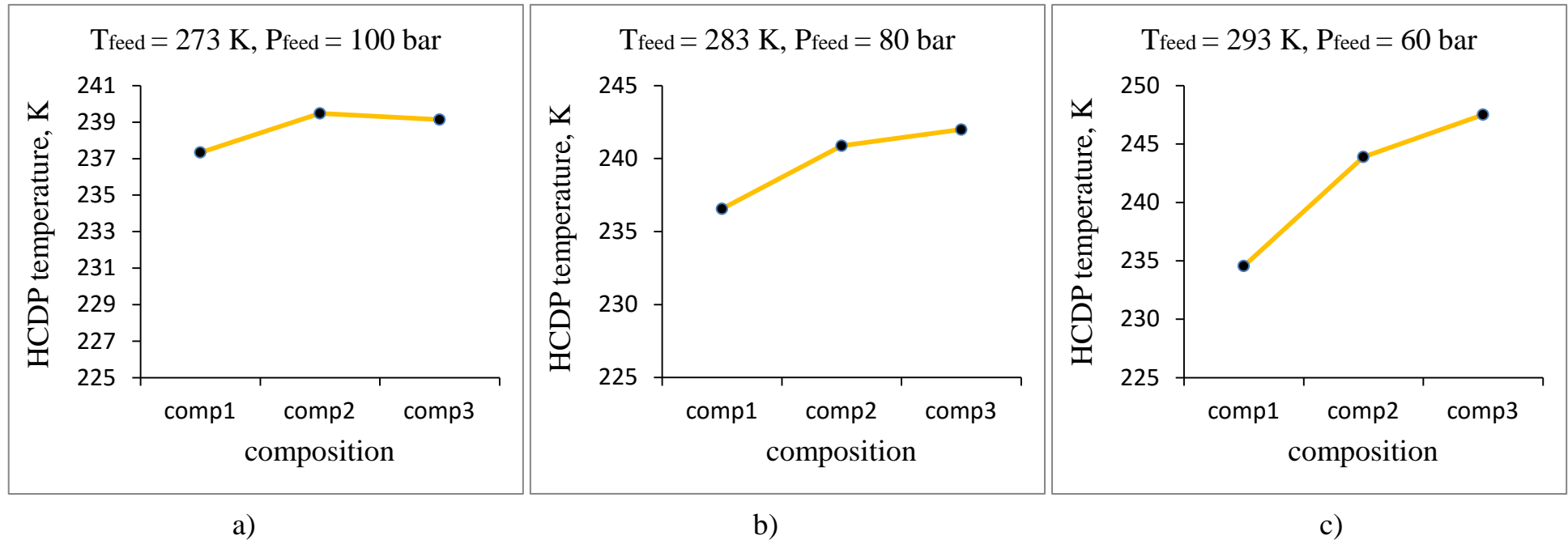


Figure 8. The influence of the raw materials composition on HCDP during the different modes of 3S-separator:

a) Mode № 1 ($T_{\text{feed}} = 273 \text{ K}$, $P_{\text{feed}} = 100 \text{ bar}$); b) Mode № 2 ($T_{\text{feed}} = 283 \text{ K}$, $P_{\text{feed}} = 80 \text{ bar}$);

c) Mode № 3 ($T_{\text{feed}} = 293 \text{ K}$, $P_{\text{feed}} = 60 \text{ bar}$)

Based on the requirements of OST Gazprom 089-2010, dew point temperature of the hydrocarbon gas trunk pipelines in winter in cold climates should not be above $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. HCDP obtained by simulation for all modes have a large stock of values indicating a high efficiency 3S-separator in order to achieve regulatory indicators HCDP.

Conclusions

The studies based on modeling of processes occurring in the supersonic separator, shows the influence of technological parameters of operation of the device on the yield and properties of the product. In particular, the following relationships are considered:

1. Extraction of target components from the C_3+ gas pressure at the inlet of the device and its composition («heavy»). In the considered range of pressure C_3+ extraction dependence on feed pressure can be considered directly proportional.

2. Removing the C_3+ components of the target gas temperature at the inlet of the device and its composition. Increasing the temperature of the crude gas reduces the degree of extraction of target components at the temperature range studied rectilinear relationship is inversely proportional regardless of composition.

3. Removing the target component C_3+ from the differential pressure in the working area the apparatus and composition of raw gas. With raw weighting dependence deviation from straightness is noticed. For more composition weight deviation from straightness more expressed unlike for composition of less weight.

4. The hydrocarbon dew point temperature on the composition of the crude gas and 3S-separatormodes. Raw material weighting results in HCDP temperature increasing, for all 3S-separator working modes HCDP temperature still satisfies current requirements for transported gas. Raw material weighting for all studied 3S-separator working modes leads increasing of HCDP temperature of product slowing.

Большая часть технологий, предназначенных для сепарации компонентов газа и извлечения из него целевых фракций, базируется на использовании низкотемпературных процессов, в которых вследствие понижения температуры происходит конденсация и последующая экстракция компонентов газа.

Существенное влияние на эффективность процесса сепарации оказывает выбор способа охлаждения газа. Обычно охлаждение осуществляется холодильными агрегатами в сочетании с рекуперативными теплообменными аппаратами. В сепарационных установках, предназначенных для обработки больших объемов газа (более 1 млрд $\text{м}^3/\text{год}$), в основном используют для охлаждения дроссельный клапан, турбодетандерный агрегат или холодильную машину. В зависимости от требуемой степени извлечения целевых фракций используют либо одно из перечисленных устройств, либо их комбинацию.

Использование холодильных машин и турбодетандеров сопряжено не только с существенным увеличением капитальных и эксплуатационных затрат, но во многих случаях их применение невозможно из-за особенностей их эксплуатации. Например, использование этих агрегатов на многих морских платформах проблематично из-за необходимости их постоянного обслуживания, а в составе перспективных подводных добычных комплексов их применение невозможно.

Применение 3S-технологии позволяет во многих случаях отказаться от использования холодильных машин и турбодетандеров, с одновременным улучшением эксплуатационных и экономических характеристик объектов [1].

Разработчик и лицензиар данной технологии – компания Trans Lang Technologies Ltd. – TLT (Канада). Технология запатентована в России, США, Канаде, Европе, Азии, странах Южной Америки и др.[2].

Технология сверхзвуковой сепарации газового сырья нашла широкое промышленное применение в составе наземных комплексов подготовки

газа, в составе установок по подготовке газа на морских платформах, также имеется возможность использования технологии в подводных условиях.

На сегодняшний день 3S-сепараторы эксплуатируются на объектах, некоторые из которых представлены ниже:

- Губкинское УКПГ ОАО «РН-Пурнефтегаз» (Россия);
- Северо-Комсомольское УКПГ ОАО «РН-Пурнефтегаз» (Россия);
- УКПГ №1 и №2 месторождения Talimu (Китай);
- Газоперерабатывающий завод «Okoloma», Shell Petroleum Development Company (Нигерия);
- Морская платформа B11, Petronas/SSB (Малайзия);
- Месторождение Санару, Petrobras (Бразилия)[1,3,4].

Основным элементом технологии является сверхзвуковой или 3S-сепаратор (от англ. – supersonic separator), позволяющий реализовать скорость движения газа выше скорости звука в газовой среде (т.е. с числами Маха M более 1) [5]. Такое ускорение позволяет добиваться интенсивной конденсации и сепарации целевых фракций природного газа. Схема 3S-сепаратора показана на рисунке 1.

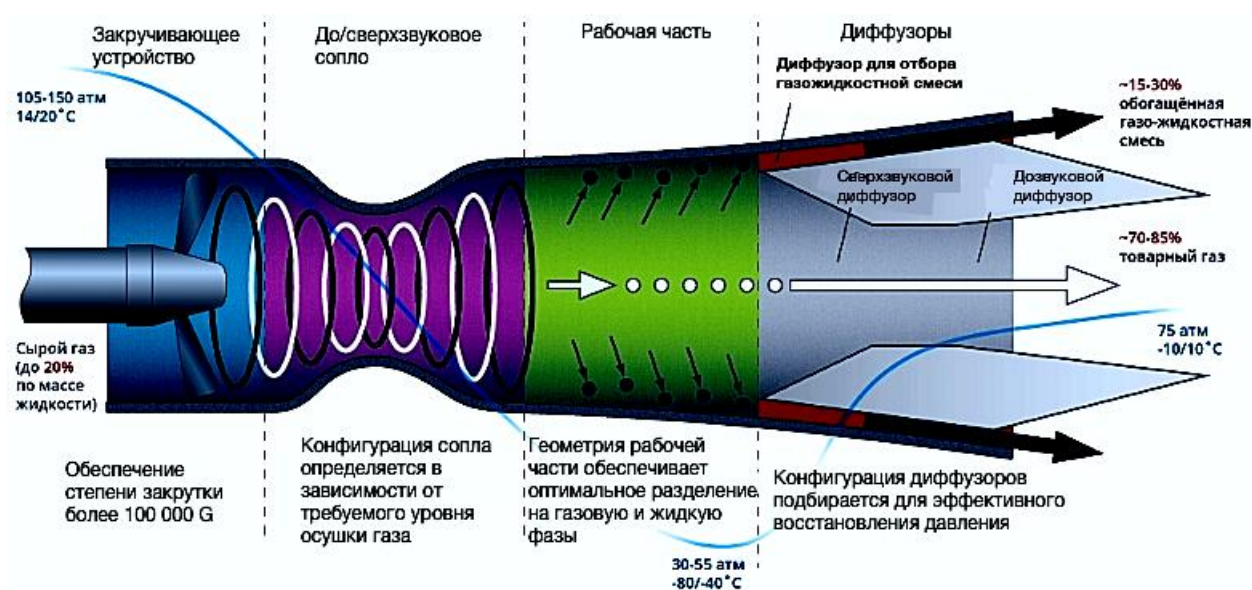


Рисунок 1. Схема 3S-сепаратора

В сверхзвуковом сепараторе входной поток газа закручивается в статическом завихрителе, далее в сверхзвуковом сопле Лавалья сырьевой поток ускоряется до скорости, превышающей скорость распространения звуковой волны в среде входного газового потока. В результате сверхзвукового движения потока происходит преобразование части потенциальной энергии газа в кинетическую, что приводит к сильному охлаждению газа. Охлажденный поток направляется в рабочую часть, в которой происходит конденсация целевых фракций природного газа и воды. Образующиеся капли двигаются к стенкам рабочей части 3S-сепаратора за счет центробежных сил, обусловленных вращением потока. На выходе из рабочей части формируется центральное ядро потока, очищенное от целевых фракций, и пристеночный двухфазный пограничный слой, состоящий из жидкости (углеводородов и воды) и газа. Двухфазный пристеночный слой, отделенный от ядра потока, направляется в диффузор газожидкостной смеси щелевой формы, в котором происходит торможение потока. Очищенный центральный газовый поток из ядра потока поступает в диффузор газа и также затормаживается.

В результате достижения сверхзвуковых скоростей газа могут быть реализованы температуры потока до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому сверхзвуковой сепаратор позволяет реализовать глубокое извлечение целевых компонент из природного газа [6,7]. Распределение значений скорости движения газового потока в 3S-сепараторе показано на рисунке 2.

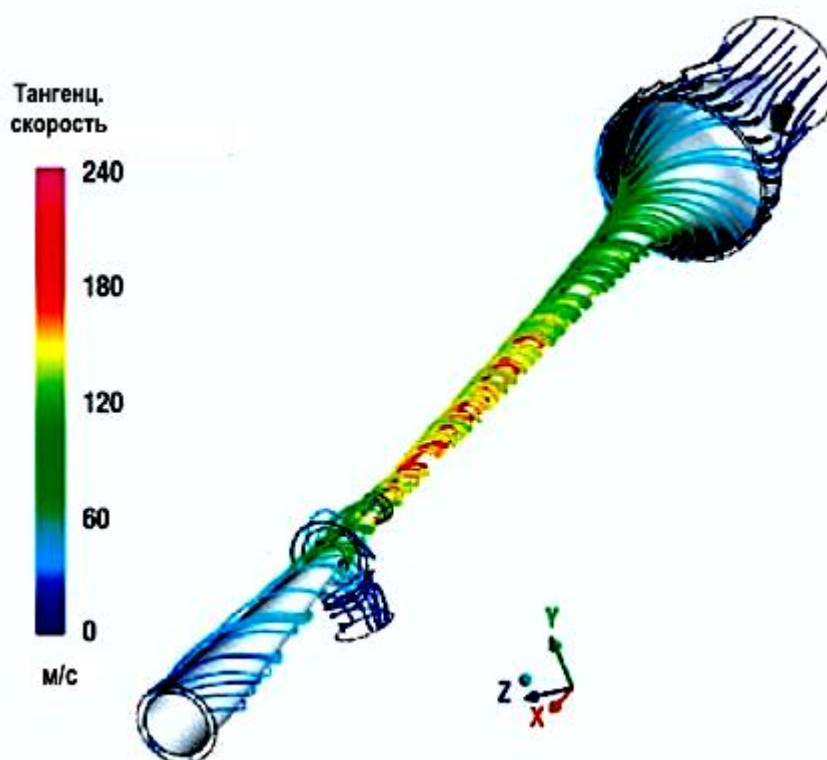


Рисунок 2. Распределение скоростей движения газового потока в 3S – сепараторе

Низкотемпературная сепарация, основанная на технологии 3S-сепарации, находит применение в установках подготовки природного газа к транспорту (извлечение компонентов тяжелее пентана C_5+ и воды), в системах, используемых для извлечения углеводородов тяжелее метана (этан, пропан, бутан и т.д.). Также данный метод может быть использован для извлечения кислых компонентов (CO_2 , H_2S) из состава углеводородного газа. По разным оценкам, на сегодняшний день около трети мировых запасов природного газа имеет высокое содержание кислых компонентов, и эта цифра возрастает по мере истощения запасов газа с низким содержанием кислых компонентов. Данный факт является причиной возрастающего интереса к сверхзвуковой сепарации, как к способу очистки газа от кислых компонентов [8,9].

Основными преимуществами 3S-технологии перед остальными процессами низкотемпературной сепарации являются:

- отсутствие динамических элементов в конструкции аппарата, что

обуславливает надежность устройства;

- простота монтажа и эксплуатации;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- сравнительно малые габариты и металлоемкость установки;
- возможность работы 3S-сепараторов при наличии жидкости во входном потоке газа (что абсолютно неприемлемо для турбодетандеров);
- более широкий диапазон рабочих параметров и составов сырья по сравнению с турбодетандерными агрегатами;
- возможность работы устройства без контроля со стороны технологического персонала, а также в подводных добычных комплексах;
- отсутствие необходимости использования ингибиторов гидратообразования, поскольку время пребывания сырья в 3S-сепараторе при низких температурах составляет сотые доли секунды [1].

Моделирование процесса

В ходе данной работы проведено моделирование процесса сверхзвуковой сепарации углеводородного газа, приближенного по составу к попутному, в среде моделирования UniSim Design. Последующее изучение влияния технологических параметров на процесс извлечения целевых компонентов газа и подготовки газа к транспорту в соответствии с требованиями.

Рабочая среда моделирования включает в себя необходимые для решения поставленной задачи составные компоненты сырья, объекты (материальные и энергетические потоки, технологическое оборудование, средства контроля и регулирования процесса, логические операции) и утилиты.

В качестве термодинамического пакета уравнений для моделирования было выбрано уравнение состояния Пенга-Робинсона.

Для моделирования устройства 3S-сепаратора стандартными средствами UniSim Design, необходимо воспроизвести 3 физических процесса,

протекающих в аппарате:

- расширение входного потока газа и его охлаждение;
- сепарация сконденсированного газожидкостного потока на газовый и газожидкостной потоки;
- компримирование разделенного газового потока.

Необходимо также сделать оговорку, что программная среда дает наиболее точные результаты при моделировании равновесных процессов. Поскольку процесс, протекающий в сверхзвуковом сепараторе неравновесный, данный способ моделирования рассматривается в качестве первого приближения к реально протекающим процессам.

Схематически устройство для реализации способа сверхзвуковой сепарации представлено на рисунке 3. Полная мнемосхема, полученная в результате моделирования средствами UniSim Design, показана на рисунке 4.

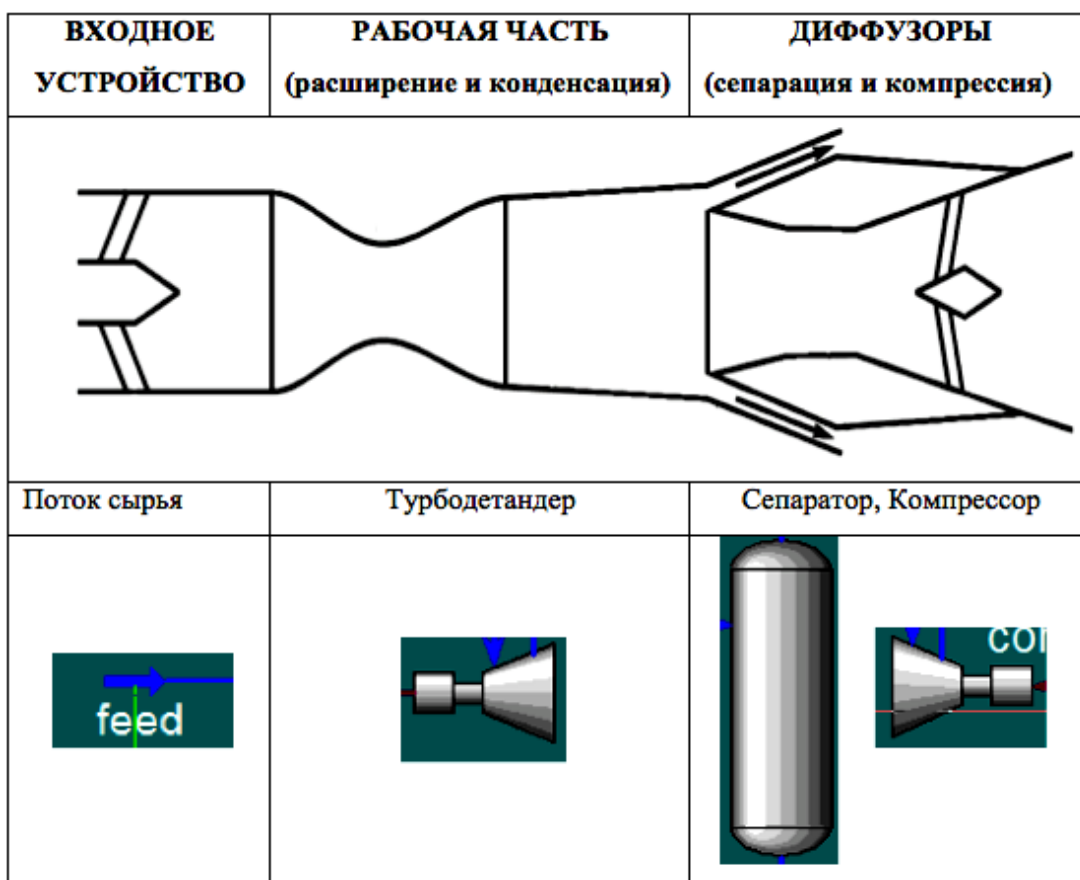


Рисунок 3. Принципиальная схема моделирования процесса 3S-сепарации

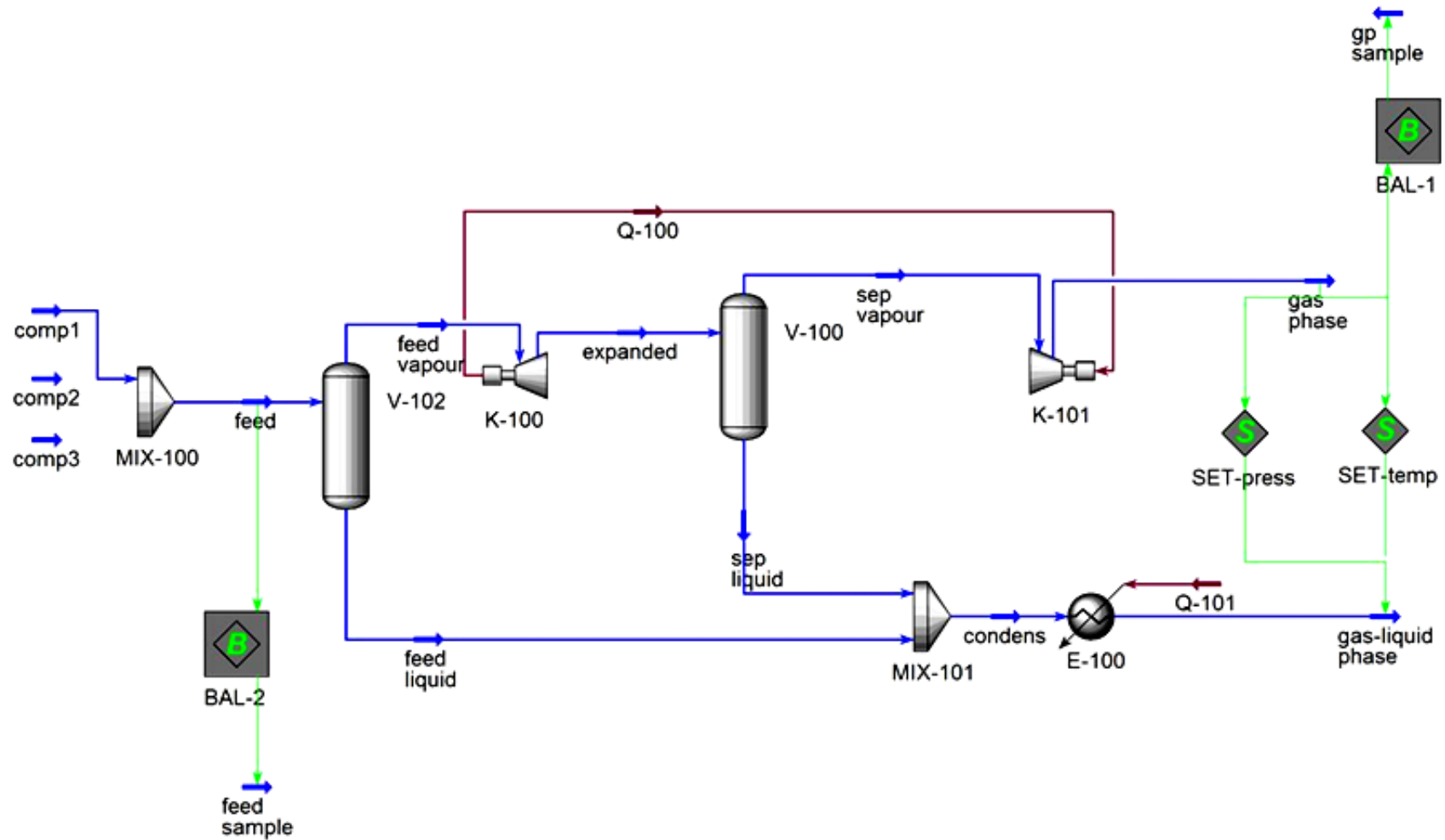


Рисунок 4. Мнемосхема процесса

Исследование проводилось для потока сырья трех различных составов (comp1, comp2, comp3), подключаемых в расчет поочередно; калорийность (жирность) и молекулярная масса составов соответственно возрастают.

Поскольку рабочая часть 3S-сепаратора, в которой происходит расширения газа, представлена в моделировании турбодетандером K-100, то подаваемый на прием турбодетандера поток газового сырья (feed vapour) не должен содержать жидкой фазы. Для этого перед K-100 установлен двухфазный сепаратор V-102. Таким образом, процессы, протекающие в рабочей части сверхзвукового сепаратора симулируются в среде UniSim Design посредством двухфазного сепаратора и турбодетандера. Значение перепада давления через турбодетандер задано равным 70% от входного давления.

Для воспроизведения процессов, протекающих в диффузорах 3S-сепаратора (разделение на газожидкостной и газовой потоки; частичное восстановление начального давления потока) средствами UniSim Design использовались двухфазный сепаратор V-100 с частичным (15%) переносом газовой фазы в поток жидкости, и компрессор K-101, работа которого осуществляется за счет генерируемого детандером K-100 энергетического потока Q-100.

Продукты сверхзвукового сепаратора представлены двумя материальными потоками – газовым (gas phase) и газожидкостным (gas-liquid phase). Характеристики продуктовых потоков (давление и температура), согласно режиму работы 3S-сепаратора, приводятся к одинаковым значениям при помощи логических операций выравнивания давления и температуры (SET-press, SET-temp).

Составы сырьевых потоков представлены в таблице 1.

Таблица 1. Компонентный состав потоков сырья

Компонент	comp1	comp2	comp3
CO ₂	0,0065	0,0200	0,0300
Азот	0,0300	0,0250	0,0050
Метан	0,8602	0,8098	0,7800
Этан	0,0500	0,0700	0,0800
Пропан	0,0250	0,0300	0,0450
и-Бутан	0,0060	0,0070	0,0090
н-Бутан	0,0060	0,0100	0,0100
и-Пентан	0,0015	0,0040	0,0060
н-Пентан	0,0005	0,0030	0,0060
н-Гексан	0,0030	0,0050	0,0070
н-Гептан	0,0002	0,0010	0,0024
н-Октан	0,0000	0,0003	0,0005
н-Нонан	0,0000	0,0000	0,0001
Метилмеркаптан	0,0050	0,0070	0,0080
Этилмеркаптан	0,0050	0,0070	0,0090
H ₂ S	0,0000	0,0000	0,0010
H ₂ O	0,0010	0,0010	0,0010
Итого	1,00	1,00	1,00
Молекулярная масса	19,22	20,84	22,24

Влияние давления на извлечение целевых компонентов

Для каждого состава сырьевого потока изучалась зависимость извлечения фракции C₃+ (% масс.) в сконденсированную фазу газожидкостного потока (gas-liquid phase) от давления на входе в 3S-сепаратор в диапазоне 60-100 бар шагом 10 бар при температуре сырья +10 °С. На рисунке 5 приведены графики полученных зависимостей.

Полученные в ходе исследования данные зависимости извлечения фракции C₃+ от давления сырья позволяют сделать вывод о том, что в рассматриваемом диапазоне давлений извлечение целевых компонентов растет линейно.

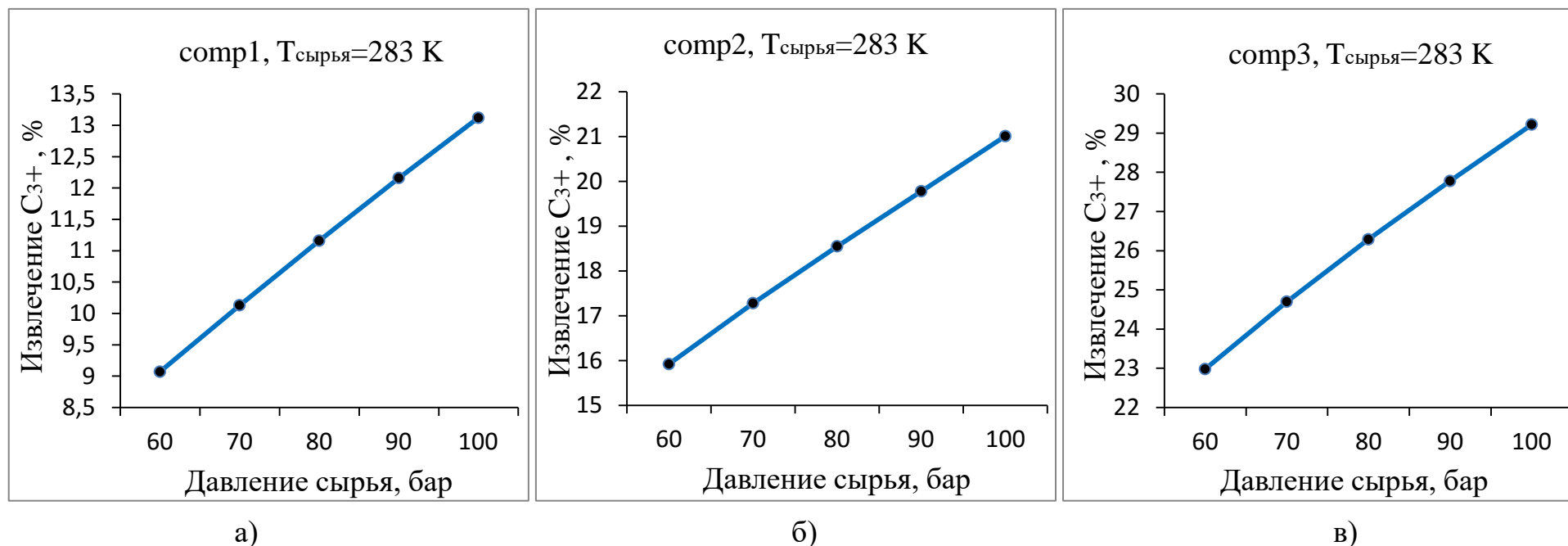


Рисунок 5. Зависимости извлечения целевых компонентов C_{3+} от давления на входе в аппарат газа различного состава при $T_{\text{сырья}} = 283 \text{ К}$: а) comp 1; б) comp 2; в) comp 3

Влияние температуры на выход целевых компонентов

Результаты исследования зависимости извлечения компонентов C_3+ в % масс. от температуры входного сырьевого потока при давлении на входе в устройство 100 бар представлены на рисунке 6.

Для всех рассмотренных потоков сырья различного состава (comp 1, comp 2, comp 3) отклонения графиков от линейности незначительно. Необходимо также отметить, что температура, в отличие от давления, влияет антибатно на выход сжиженного продукта вне зависимости от состава сырья.

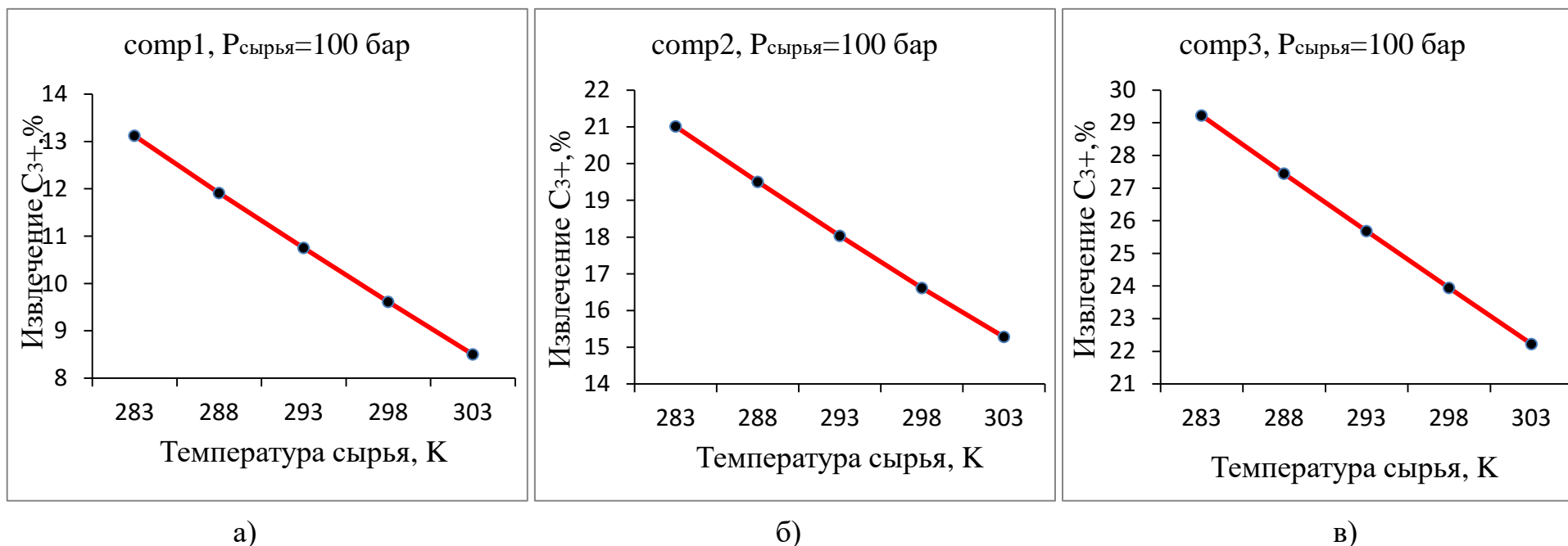


Рисунок 6. Зависимость извлечения целевых компонентов C_{3+} от температуры сырья различного состава при $P_{\text{сырья}}=100$ бар: а) comp1; б) comp2; в) comp3

Влияние перепада давления в 3S-сепараторе на извлечение целевых компонентов

Для достижения требуемого снижения температуры сырья должно быть обеспечено необходимое ускорение потока газа (определяется геометрией устройства) [8], следовательно, и перепад давления при прохождении газа через рабочую часть 3S-сепаратора.

Проведены расчеты степени извлечения целевых компонентов C_3+ при различных значениях перепада давления в диапазоне значений 40-80 бар. Рассмотрены все три состава углеводородного газа. Давление на входе в сепаратор неизменно и равно 100 бар, температура сырья для составов сырья $comp1$, $comp2$, $comp3$ равна $+20$ °С и также неизменна. Результаты расчетов приведены в графической форме (рисунок 7).

Согласно полученным данным, представленным на рисунке 7, степень извлечения фракции C_3+ для состава сырья $comp1$ находится в линейной зависимости от перепада давления в сверхзвуковом сопле сепаратора. С утяжелением сырья (составы $comp2$, $comp3$) наблюдается отклонение зависимости от линейности, причем для состава $comp3$ с большей молекулярной массой, отклонение от линейности и «выполаживание» графика значительнее, чем для состава $comp2$.

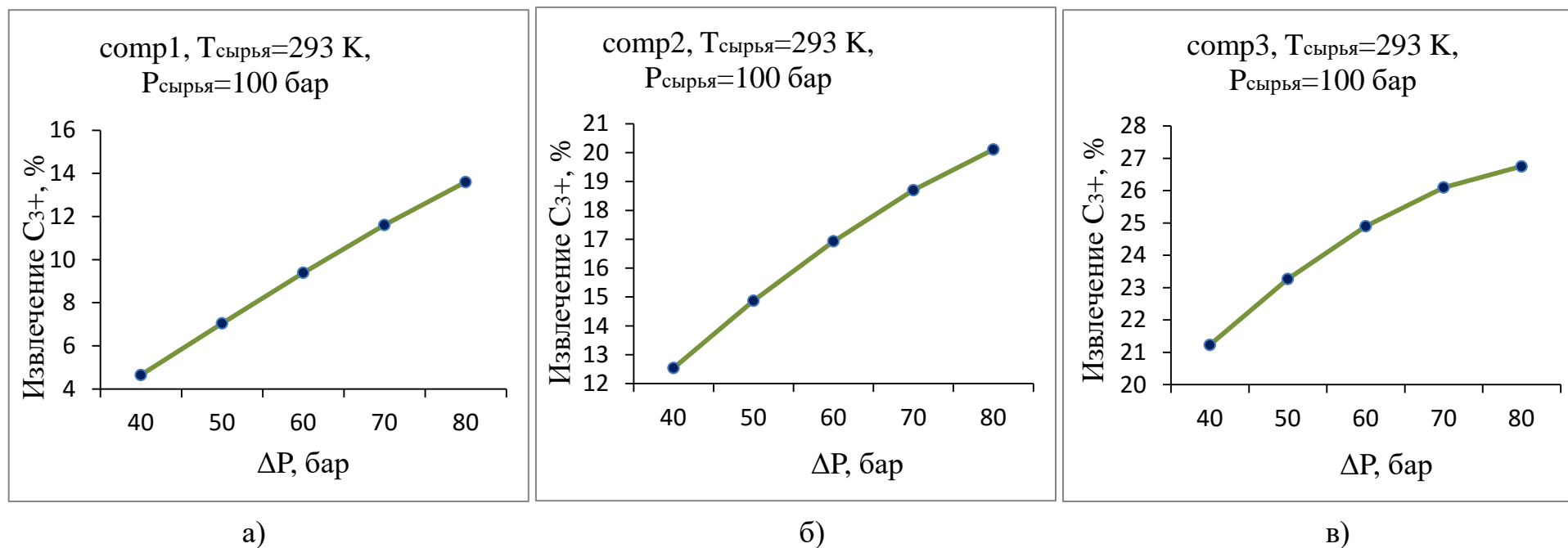


Рисунок 7. Зависимость извлечения целевых компонентов C_{3+} от перепада давления в рабочей части сверхзвукового сепаратора сырья для различного состава газа при $T_{сырья}=293$ К, $P_{сырья}=100$ бар: а) comp1; б) comp 2; в) comp 3

Влияние изменения состава сырья на температуру точки росы полученного продукта

Одними из требований, предъявляемых к газу при осушке и очистке [10], являются температура точки росы по углеводородам ($TTR_{ув}$) и температура точки росы по воде ($TTR_{в}$). В рассмотренных моделях сепарации гипотетических составов сырья $comp1$, $comp2$, $comp3$ в интервалах начальных температур от 0 до +20 °С и давлений 60–100 бар в составе продукта gas phase отсутствует вода, следовательно, значение $TTR_{в}$ не определяется. $TTR_{ув}$ определяется компонентным составом продукта и зависит от степени сепарации сырья.

Для определения зависимости $TTR_{ув}$ продукта от составов газового сырья были рассмотрены 3 режима работы программной модели сверхзвукового сепаратора: режим №1 – начальные температура и давление, соответственно 0 °С и 100 бар; режим №2 – (+10 °С) и 80 бар; режим №3 – (+20 °С) и 60 бар. Результаты программного моделирования представлены на рисунке 8. Температуры точек росы по углеводородам (на графиках – $TTR_{ув}$ по оси ординат) приведены к усредненному значению давления в магистральных трубопроводах газа 75 бар.

Согласно полученным результатам при рассмотренных режимах работы сверхзвукового сепаратора можно считать, что $TTR_{ув}$ продукта для более «жирного» состава сырья выше, чем для менее «жирного». Для режима № 1 наблюдается незначительное снижение. Также необходимо отметить, что с утяжелением газового сырья рост $TTR_{ув}$ продукта замедляется.

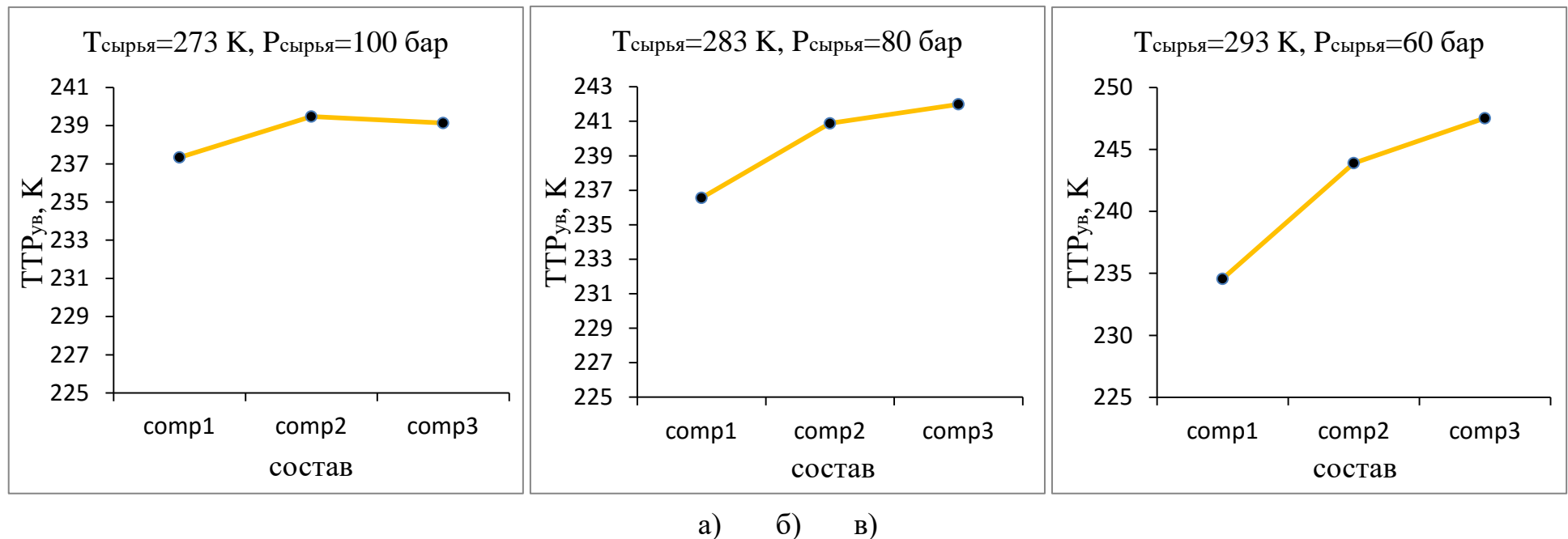


Рисунок 8. Влияние состава сырья на $TTP_{ув}$ при различных режимах работы 3S-сепаратора:
 а) режим № 1 ($T_{сырья} = 273 K, P_{сырья} = 100 \text{ бар}$); б) режим № 2 ($T_{сырья} = 283 K, P_{сырья} = 80 \text{ бар}$);
 в) режим № 3 ($T_{сырья} = 293 K, P_{сырья} = 60 \text{ бар}$)

Исходя из требований ОСТ Газпром 089-2010, температура точки росы по углеводородам газов магистральных трубопроводов в зимний период в холодных климатических зонах не должна быть выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. $\text{TTR}_{\text{ув}}$, полученная в результате моделирования при всех режимах работы имеет большой запас значений, что говорит о высокой эффективности 3S-сепаратора в целях достижения нормативных показателей по $\text{TTR}_{\text{ув}}$.

Выводы

В результате проведенных исследований, основанных на моделировании процессов, протекающих в сверхзвуковом сепараторе, показано влияние технологических параметров работы устройства на выход и свойства продукта. В частности, получены следующие зависимости:

1. Извлечение целевых компонентов C_3^+ от давления газа на входе в аппарат и его состава («жирности»). В рассматриваемых условиях проведения процесса сепарации для данных составов сырья, зависимость извлечения целевых компонентов от давления потока сырья прямо пропорциональна.

2. Извлечение целевых компонентов C_3^+ от температуры газа на входе в аппарат и его состава. Увеличение температуры сырого газа снижает степень извлечения целевых компонентов, на исследованном интервале температур зависимость линейна, обратно пропорциональна вне зависимости от состава.

3. Извлечение целевых компонентов C_3^+ от перепада давления в рабочей зоне аппарата и состава сырого газа. С утяжелением состава сырья наблюдается отклонение графика зависимости от линейности. Для наиболее тяжелого состава сырья отклонение от линейности и «выполаживание» графика зависимости более выражено, чем для менее тяжелых составов сырья.

4. Температура точки росы по углеводородам от состава сырого газа и режимов работы 3S-сепаратора. Результатом утяжеления сырья является повышение $TTP_{ув}$ продукта, тем не менее, для всех рассмотренных режимов работы $TTP_{ув}$ удовлетворяет актуальным требованиям к транспортируемому газу. В исследованных режимах работы сепаратора с утяжелением сырья рост $TTP_{ув}$ продукта замедляется.

References

1 Bagirov L. A., Imaev S. Z. Experience of 3S-technology Application for Natural Gas Processing at Gas Facilities in Russia and China // Report of SPE Russian Petroleum Technology Conference 2015. p. 14. [in Russian].

2 Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components / Alferov V. I. [et al.] // «Oil&Gas», 2005. № 20. pp. 96-102. [in Russian].

3 Hugh Epsom, Marco Betting. Supersonic separator gains market acceptance // World Oil magazine, 2007. № 4. pp. 197-200.

4 Adrian Cottrill. Tunu deal is the next leap ahead for Twister™ // Upstream magazine, 2012. № 4. pp. 98-99.

5 Imaev S. Z., Nikolaev E. A. Study of gas flow in channel of supersonic separator // Collection of research papers «Modern science», 2012. № 2. pp. 290-294. [in Russian].

6 Application of energy-saving supersonic gas separation technology in the Far North gas-condensate fields / Bagirov L. A. [et al.] // «Oil Gas Exposition», 2014. № 1. pp. 34-38. [in Russian].

7 Devisilov V. A., Zhidkov D. A. Gasdynamic refining of Associated petroleum gas – way to saving the planet// «News of the Samara Scientific Center of Russian Academy of Science», 2014. №1. pp. 1721-1727. [in Russian].

8 Torres Gonsalez, Michael Netusil, Pavel Ditl. Raw gas dehydration on supersonic swirling separator // Czech Technical University in Prague, 2012. pp. 76-84.

9 Peter Schinkelshoek, Hugh D. Epsom. Supersonic gas conditioning – commercialization of Twister™ technology // 87th Annual Convention. Grapevine, Texas, USA. March, 2008. pp. 2-7.

10 Gazprom Company Standart 089-2010. Flammable natural gas supplied and transported via main gas pipelines. Technical specifications. Moscow. 2010. pp. 5-7. [in Russian].

Список используемых источников

1 Багиров Л. А., Имаев С. З. Опыт применения 3S технологии для обработки природного газа на газовых объектах России и Китая: докл. Рос. нефтегаз. техн. конф. //SPE (ноябрь). 2015. С. 14.

2 Эффективное разделение компонентов природного газа в сверхзвуковом сопле/ В. И. Алферов [и др.] // Нефть и газ. 2005. № 20. С. 96-102.

3 Hugh Epsom, Marco Betting. Supersonic separator gains market acceptance // World Oil magazine. 2007. №4. pp. 197-200.

4 Adrian Cottrill. Tunu deal is the next leap ahead for Twister™ // Upstream magazine. 2012. №4. pp. 98-99.

5 Имаев С. З., Николаев Е. А. Исследование течения газа в канале сверхзвукового сепаратора // Современная наука: сб. науч. ст. 2012. №2. С. 290-294.

6 Использование энергосберегающей технологии сверхзвуковой сепарации газа на газоконденсатных месторождениях крайнего севера / Л. А. Багиров [и др.]// Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 1. С. 34-38.

7 Девисилов В. А., Жидков Д. А. Газодинамическая очистка попутного нефтяного газа – путь к улучшению экологии планеты //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. №1. С. 1721-1727.

8 Torres Gonsalez, Michael Netusil, Pavel Ditzl. Raw gas dehydration on supersonic swirling separator // Czech Technical University in Prague, 2012. pp. 76-84.

9 Peter Schinkelshoek, Hugh D. Epsom. Supersonic gas conditioning – commercialization of Twister™ technology // 87th Annual Convention. Grapevine, Texas, USA. March, 2008. pp. 2-7.

10 СТО Газпром 089-2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. М., 2010. С. 5-7.

About the authors

Сведения об авторах

D. A. Salikaev, Master Student of MGR 12-14-01 group of the Chair «Development and Exploitation of Oil and Gas Fields», FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Саликаев Д. А., магистрант гр. МГР 12-14-01, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E-mail: salikaevd@mail.ru

O. A. Gumerov, Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor of the Chair «Development and Exploitation of Oil and Gas Fields», FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Гумеров О. А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

e-mail: gumerovoa@rambler.ru