

**Khalilov I.M.¹, Muxamadiyev B.T.², Khalilova F.M.³,
Mirzayeva Sh.U.³, Isomova I.P.³,**

¹Institute of Microbiology of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan, Bukhara c., Uzbekistan

²Bukhara State Technical University, Bukhara,

³Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan

PECULIARITIES OF EXTRACTING INGREDIENTS FROM PLANT MATERIALS

Abstract. This article provides a review of carbon dioxide extraction, the specifics of the extraction process from plant materials, and an analysis of the properties of liquid carbon dioxide as a solvent for extracting ingredients from plant materials. This article is intended for scientists, engineers, and technicians in the food and processing industries, as well as the pharmaceutical industry. The development of energy-saving technologies that enable the production of new, high-quality products in the pharmaceutical, perfume, and food industries is driven by the pressing public demand for high-quality medicines and food products, as well as environmentally friendly production. One solution to this problem is the use of liquefied and compressed carbon dioxide as an extractant. Extraction with liquefied carbon dioxide significantly expands the range of biologically active compounds extracted and enables the production of concentrations of biologically active substances in the final product that are impossible to achieve using any other known extraction method. The structural features of our region's plant materials - fruit pits, grape seeds, pumpkin, melon, etc. - require the development of technological extraction modes using liquid and supercritical carbon dioxide, the kinetics and dynamics of the extraction process, and the determination of the effect of the extraction process on the yield and quality of the resulting product.

Keywords: Plant materials, extraction of plant materials, properties of extracted material, obtaining bioactive components, CO₂ extraction process, oil quality analysis.

Introduction. Extraction is the primary technological process for extracting biologically active components from plant materials. Extraction (from the late Latin *extractio* - extraction) is the process of extracting substances from solutions or dry mixtures using selective solvents (extractants) that are immiscible with the solution but in which the substance dissolves better than in the primary solvent [1].

In a typical extraction process in a "liquid + solid" system, mass trans-

fer occurs, characterized by the transition of one or more substances from one phase (raw material) to another (extractant) by diffusion. A distinction is made between the following types of diffusion: 1) molecular and 2) convective.

Molecular diffusion is the process of gradual interpenetration of substances (liquid or gaseous) adjacent to each other and at macroscopic rest, caused by the chaotic motion of molecules. The intensity of diffusion depends on the kinetic energy of the molecules. The higher it is, the more intense the diffusion process. For example, gases easily diffuse into each other because their molecules move at high speeds. Liquids and solutions in which molecular movement is more restricted diffuse significantly more slowly [2].

Materials and Research methods. The driving force behind diffusion is the difference in concentrations of dissolved substances in contacting liquids. The greater the concentration difference, the greater the amount of substance that will migrate, all other things being equal, in a given time. The rate of diffusion increases with increasing temperature, as this increases the speed of molecular movement. The rate of diffusion depends on the relative molecular mass of the substance. Diffusion is naturally influenced by the size of the surface area separating the substances, as well as the thickness of the layer through which diffusion occurs. Obviously, the larger the surface area separating the substances, the more substances diffuse, and the thicker the layer, the slower the concentration equalization. Finally, the movement of a substance requires a certain amount of time. The longer diffusion takes, the more substance passes from one medium to another [1]. **The aim of the study** is to analyze review materials on carbon dioxide extraction and extraction from plant materials.

The influence of factors on diffusion processes can be expressed mathematically by the following equation:

$$\frac{dM}{d\tau} = DF \frac{y_{cur} - y}{d}, \quad (1.1)$$

here dM - is the amount of substance diffused during diffusion time $d\tau$; y_{cur} - y is the concentration difference; F - is the phase boundary surface; d is the thickness of the layer through which diffusion occurs; D - is the molecular diffusion coefficient, showing the amount of substance in kg that diffuses in 1 s through a surface of 1 m², with a layer thickness of 1 m and a concentration difference of 1 kg/m³.

According to this equation, known as Fick's law of diffusion, the amount of diffused substance is directly proportional to the concentration difference, the phase boundary, the diffusion time, the diffusion coefficient, and inversely proportional to the layer thickness [2].

As for the diffusion coefficient, its mathematical expression was given by Einstein:

$$D = \frac{RT}{N_0} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r}, \quad (1.2)$$

here R - gas constant 8,32 J/(deg·mol); T - absolute temperature; N_0 - Avogadro's number ($6,06 \cdot 10^{23}$); η - viscosity in $\text{н}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; r - radius of diffusing particles in m.

From the above equation, it is clear that the diffusion coefficient increases with increasing temperature and decreases with increasing viscosity of the medium and particle size of the substance. In other words, the smaller the radius of the diffusing particles, the faster the diffusion. For example, solutions of proteins, mucus, and the like diffuse very slowly because, as high-molecular compounds, they have very low diffusion coefficients. A completely different picture is observed in solutions of substances in a state of molecular or ionic-molecular dispersion. These substances, having relatively small particle sizes, diffuse incomparably faster.

In practice, numerical values for molecular diffusion coefficients are taken from reference books or specifically calculated.

In the flow core, matter moves toward the phase boundary primarily due to the movement of molar (composed of a large number of molecules) components of the medium, i.e., convective diffusion. In the boundary layer, it moves due to molecular diffusion. The total transfer of matter from (or to) the phase boundary is called mass transfer [2].

The rate of the process in this case is:

$$\frac{dM}{d\tau} = \beta F(y_{cur} - y_{avr}) \quad (1.3)$$

here β - convective diffusion coefficient, which is the amount of substance transported 1 c through the surface in 1 m^2 , with a concentration difference equal to 1 kg/m^3 ; F - phase boundary; $y_{cur} - y_{avr}$ - the difference between the saturation concentration of the solution and the average concentration in the bulk.

Convective transfer of matter occurs as a result of vibration, temperature changes, mixing, etc. - that is, factors that cause the movement of the liquid, and along with it, the dissolved substance, in a turbulent flow. In other words, the mechanism of convective diffusion involves the transfer of matter in the form of individual small volumes of its solution, with molecular diffusion also occurring within these small volumes.

Convective diffusion obeys law (1.3), according to which the rate of

convective diffusion increases with increasing phase contact area, concentration difference, process duration, and convective diffusion coefficient.

In convective diffusion, the size of the diffusing substance molecules, the viscosity of the solvent, and the kinetic energy of the molecules become secondary. Hydrodynamic conditions, i.e., the velocity and mode of fluid motion, become primary factors determining the rate of convective transfer of substances. Thus, molecular and convective transfers differ from each other not only in their mechanisms but also in that their rates depend on diverse groups of factors. Typically, the rate of convective transfer is many times greater than the rate of molecular transfer.

The above discussion pertains to so-called free diffusion, i.e., to the case where there are no barriers between contacting solutions or liquids; in other words, when molecular and convective diffusion proceed freely, unimpeded.

However, when extracting ingredients from plant materials with a porous structure, substances diffuse from the internal structures of the material particle, and the extraction process is complicated by a number of factors [2].

The structure of plant substances subject to extraction is based on capillary-porous systems [2].

The tissues that make up oilseed fruits and seeds are composed of hundreds of cells, which are the fundamental functional units of higher plants. Significant differences can be observed between cells of tissues with different specializations. These differences allow us to determine the tissue's identity and specialization, and sometimes even the plant species, using morphological characteristics [3].

The specialization of the underlying tissue determines the development of intracellular structures that ensure the synthesis of cellular reserve substances. At the same time, individual cells, while varying in shape, size, and chemical composition depending on the physiological functions of the tissue, the type of oilseed plant, and age, retain a structural plan common to all plant cells:

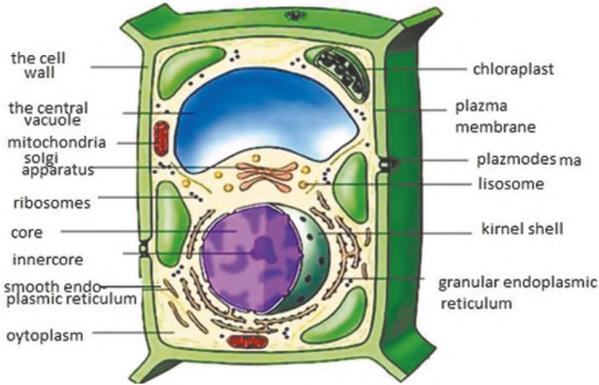


Figure 1 - Diagram of the structure of a plant cell [3].

A distinctive feature of plant cells is the presence of a membrane that is impermeable to solid particles. The hard membrane, acquired by plants at very early stages of evolution, provided the necessary protection for intracellular contents, but also determined the specific nature of plant nutrition: nutrients can only enter the cell from the environment in a dissolved state [3].

Beneath the cell membrane is the cytoplasm, which contains the nucleus and numerous organelles of varying structure and function (Figure 1). When observed under an optical microscope, the cytoplasm of growing plant cells, such as during seed maturation or germination, appears as a transparent, semi-liquid, granular mass within which individual organelles are visible. The nucleus is located in the center of a young cell, while in an adult cell, it is located near the cell wall.

A characteristic feature of plant cells is the presence of a rigid (hard) cell wall. The cell wall determines the cell's shape, provides mechanical strength and support to plant cells and tissues, and protects the cytoplasmic membrane from destruction under the hydrostatic pressure generated within the cell. However, this cell wall cannot be considered solely as a mechanical framework.

The cell membrane has properties that allow it to withstand intracellular water pressure while also being extensible and capable of growth. It acts as an anti-infective barrier and is involved in the absorption of minerals, acting as a kind of ion exchanger. The cell membrane is composed of cellulose, hemicelluloses, pectin, lipids, and a small amount of protein.

The components of the cell membrane are waste products of the cell. They are secreted from the cytoplasm and undergo transformations on the surface of the plasma membrane. Primary cell walls contain, on a dry matter basis, 25% cellulose, 25% hemicellulose, 35% pectin, and 1-8% structural proteins. However, these figures vary considerably. For example, the cell walls of cereal coleoptiles contain up to 60-70% hemicellulose, 20-25% cellulose, and 10% pectin. At the same time, endosperm cell walls contain up to 85% hemicellulose. Secondary cell walls contain more cellulose. The backbone of the cell wall is made up of intertwined micro- and macrofibrils of cellulose. Cellulose, or fiber ($C_6H_{10}O_5$)_n, is long, unbranched chains consisting of 3,000-10,000 D-glucose residues linked by β -1,4-glycosidic bonds. Cellulose molecules are combined into micelles, micelles are combined into microfibrils, and microfibrils are combined into macrofibrils. Macrofibrils, micelles, and microfibrils are linked into bundles by hydrogen bonds. The diameter of a micelle is 5 nm, the diameter of a microfibril is 25–30 nm, and that of a macrofibril is 0.5 μ m. The structure of micro- and macrofibrils is heterogeneous (Figure 2) [2].

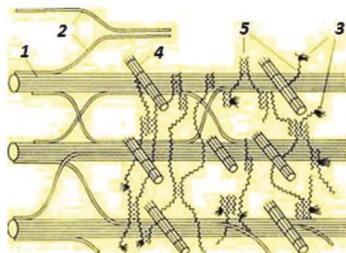


Figure 2 - Cell wall structure (according to Nach Lucasund Wolf, 1993) [2]
 1-cellulose microfibrils; 2-hemicellulose; 3-rhamnogalacturonan; 4-extension protein; 5-pectin substances.

The mechanical oil extraction method requires grinding the raw material to partially disrupt the cellular structure and improve the subsequent heat-moisture treatment process.

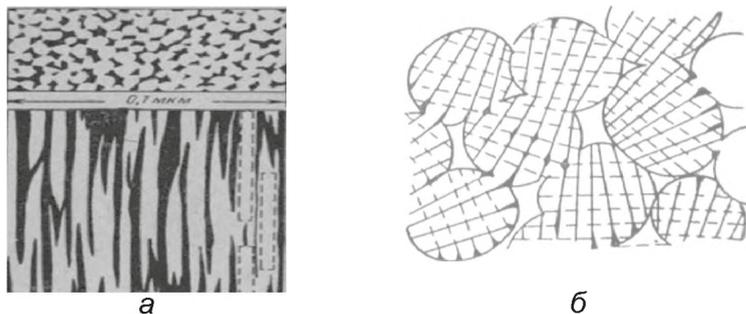
However, after grinding, the maximum passage through a 1 mm sieve is 60%, whereas for cottonseed meal, according to [3], the plant cell size is 33.5 x 17.5 μ m, for soybean 75.0 x 24.4 μ m, for sunflower 45.5 x 30.0 μ m, and the cell wall thickness of oil-containing tissues ranges from 0.9 to 1.3 μ m. Therefore, at a kernel moisture content of 9–10%, rolling does not ensure maximum disruption of the cellular structure, and prolonged heat-moisture treatment degrades the quality of the oil and other kernel components.

All these structural elements of the plant cell create an obstacle to the diffusion of substances dissolved in the vacuole. Diffusion (mass transfer) phenomena predominate during the extraction process, based on the concentration equalization between the solvents (extractant) and the solution of substances contained within the cell. The peculiarities of extracting substances from materials with a cellular structure are related to the fact that the cell wall, whose physiological state can vary, stands in the way of the substances contained within the cell. For example, a living plant cell has a parietal layer of protoplasm of a certain thickness (Figure 2). It leaves a special imprint on the properties of the cell wall, which acts as a barrier separating the solution inside the cell (cell sap) from the fluid outside the cell.

Until the protoplasm is destroyed (denatured), the cell wall is a semi-permeable barrier, preventing substances dissolved in the cell sap from escaping. Substance transport within the tissue occurs at an extremely low rate. In this case, only the penetration of the extractant into the cell (osmosis) is possible.

Therefore, plant tissue in which the protoplasm is not destroyed must undergo special treatment (crushing, heating, freezing, fermentation, etc.) before or during the initial stages of the extraction process.

After this treatment, the primary diffusion resistance is created by the cell membranes of plant tissue. Microfibrils and macrofibrils, which form the basis of cell membranes, are intricately intertwined and form pores of varying sizes (from 0.5 nm to 20-25 nm), through which the primary transport of substances from the cell occurs (Figures 2 and 3). Microfibrils, in turn, are constructed from bundles of cellulose macromolecules (Figures 2 and 4).



Figures 3 - Schematic diagram of the structure of the cellulose membrane of a plant cell [2]. *a* — transverse and longitudinal sections of a bundle of macrofibrils; *b* — cross section at high magnification.

Due to the small size of the pores of cell membranes and the cells themselves (5-50 μm), the substance in the liquid filling the pores is transferred solely by molecular diffusion. The total cross-sectional area of the pores through which the transfer process occurs is smaller than the total cross-sectional area of the particle in the plane under consideration; the diffusion path is longer (due to the tortuosity of the pores); furthermore, additional resistance arises due to the more frequent collisions of particles with the pore walls. Therefore, the diffusion rate in a solid particle is lower than in a pure liquid. Thus, the molecular diffusion coefficient in plant tissue (the so-called constrained diffusion coefficient), which should more accurately be called the mass conductivity coefficient, will be numerically smaller than in the corresponding solution in a free state.

Due to the destruction of protoplasm (plasmolysis), the cell wall loses its semipermeable barrier properties and begins to allow substances to pass in both directions (dialysis). In other words, the cell wall acquires the properties of a porous barrier through which biologically active substances whose molecules do not exceed the pore size can diffuse.

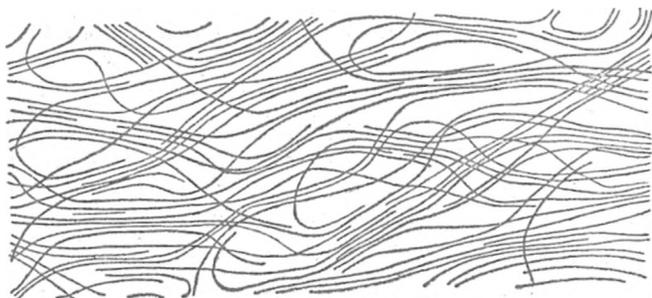


Figure 4 - Diagram of the structure of a stack of macromolecules [2].

Finally, there is another significant feature - the phenomenon of desorption observed in the cell after the extractant has penetrated it. Since the substances within the cell are bound by attractive forces, these adsorption forces must first be overcome.

Let's represent a particle of material in an extractant as a diagram (Figure 5), and denote the average concentration of extractable substances within the particle as y_1 , and on its surface as y_2 .

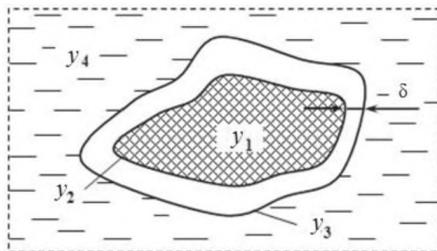


Figure 5 - Raw material particle in the extractant (diagram)

Then the amount of substance diffused from the internal structures of the particle to its surface (the first stage) is proportional to its internal diffusion coefficient D_{int} , the surface of the particle of material F , time τ , the difference in concentration inside the particle y_1 and on its surface y_2 , inversely proportional to the particle size of the plant material l and can be written in the form of an equation:

$$dM = D_{int} F \frac{y_1 - y_2}{l} d\tau \quad (1.4)$$

Here D_{int} – internal diffusion coefficient, m^2/s ; F – phase separation surface, m^2 ; l – thickness of a material particle through which substances diffuse m ; y_1, y_2 – concentration of a substance, kg/m^3 .

To express the diffusion coefficient in the pores of plant material, a correction factor B is introduced into Einstein's equation (1.2) for free diffusion, accounting for all the complications of the process. The equation for the internal diffusion coefficient in this case will be:

$$D_{int} = \frac{RT}{N_0} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r} B, \quad (1.5)$$

For a material with a cellular structure, the internal diffusion coefficient is significantly smaller than the free diffusion coefficient. For example, the free diffusion coefficient for many natural compounds is in the range of $10^{-4} - 10^{-5} m^2/s$. For these same compounds, the diffusion coefficient in the pores of a material with a cellular structure is 2–3 orders of magnitude smaller, i.e., $10^{-6} - 10^{-8} m^2/s$ [1].

In the second stage, substances diffuse from the particle surface (concentration y_2) to the outer surface of the diffusion boundary layer (concentration y_3).

tration y_3). It is now generally accepted that a layer of extractant, called the diffusion boundary layer, exists on the surface of raw material particles. This boundary diffusion layer exerts significant resistance to the further transfer of extractable substances into the extractant. The thickness of this layer depends on the hydrodynamics of the process and, primarily, on the stirring rate of the extractant. The greater the mixing rate, the thinner the boundary layer thickness. Within the diffusion boundary layer δ , the transfer of substances occurs according to the law of free diffusion and can be written as Fick's first law (1.1):

$$\frac{dM}{d\tau} = DF \frac{(y_{cur} - y_{avr})}{\delta}$$

Next, the extracted substance is transferred by the moving extractant from the phase interface and distributed throughout the entire mass of the extractant (convective diffusion).

If we denote the average concentration of the extractant in the volume surrounding the particle by y_4 , then the amount of substance transferred into the extractant by convective diffusion can be calculated from equation (1.3).

Typically, the convective diffusion coefficient β is many times greater than the molecular diffusion coefficient D .

The overall process of substance transfer from a particle of material to the extractant is expressed by the fundamental mass transfer equation:

$$M = K_y F (y - y^*), \quad (1.6)$$

here y^* - the equilibrium concentration in a given phase, corresponding to the concentration of the distributed substance in the bulk (core) of another phase; K_y is the mass transfer coefficient (m/s), which takes into account all the quantities that are quantitative characteristics of the three stages of the extraction process and is determined from the equation

$$K_y = \frac{1}{\frac{l}{D_{int}} + \frac{\delta}{D} + \frac{1}{\beta}} \quad (1.7)$$

The diffusion coefficient depends on temperature, concentration, structure of the material, physical properties of the extracted material and the solvent.

Characteristics of carbon dioxide as a solvent. Carbon dioxide. Other names are carbon dioxide, carbon dioxide, carbon dioxide, carbonic anhydride, dry ice (solid). Formula - CO_2 . A colorless gas with a slightly

sour odor and taste. Molar mass 44,0095(14) g/mol; in solid form - dry ice; type - colorless gas; CAS number [26-27]; properties: density and phase state 1,98 kg/m³, at normal conditions; 771 kg/m³, liquid; 1512 kg/m³, hard; solubility in water 1.45 kg/m³; specific heat of fusion 25.13 kJ/mol; melting point -57°C (216 K), under pressure; boiling point -78 °C (195 K), sublimates; acid dissociation constant (pKa) 6,35 and 10,33; viscosity 0,07 poz at -78°C; structure: the shape of the molecule is linear, symmetrical O=C=O with a C=O distance of 1,162 Å; chemical bonds between atoms of a molecule are covalent and polar; dipole moment is zero; The crystal lattice is quartz-shaped [4,5].

Carbon dioxide is non-toxic but does not support respiration. High concentrations in the air cause suffocation (hypercapnia), while a lack of carbon dioxide is also dangerous (hypocapnia). The concentration of carbon dioxide in the Earth's atmosphere is 0.038%.

Dehydrated carbon dioxide, both gaseous and liquid, does not corrode metals, but when watered it can cause quite severe corrosion.

Carbon dioxide is not flammable and does not support combustion due to the fact that it reduces the concentration of oxygen at the site of combustion. In high concentrations, it does not support respiratory processes, which can be used as a sterilizing factor.

Chemical properties [6,7,8]. According to its chemical properties, carbon dioxide is classified as an acidic oxide. When dissolved in water, it forms carbonic acid. Reacts with alkalis to form carbonates and hydrocarbons.

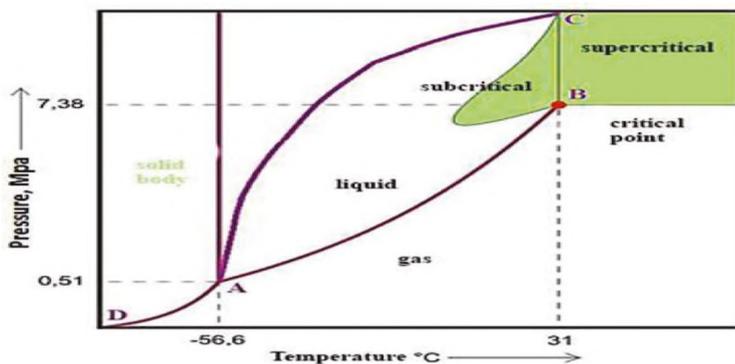


Figure 6 - Phase equilibrium diagram of CO₂:
(A – triple point, B – critical point)

From the phase equilibrium diagram of carbon dioxide it follows that this substance has a rather high triple point A. It is characterized by:

$$t_t = -56.57 \pm 0.010\text{C}, P_t = 518.6 \pm 3 \text{ kPa}, r_t = 1501 \pm 9 \text{ kg/m}^3 [6].$$

The critical point is low (B). Its parameters: $t_{cr} = 31.05 \pm 0.020C$, $P_{cr} = 7383 \pm 5 \text{ kPa}$, $r_{cr} = 468.16 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ [1-5].

At atmospheric pressure and room temperature, carbon dioxide exists only as a gas. Under pressure in the temperature range of -56.6 to $31.10^\circ C$, it readily liquefies. When cooled below its triple point or throttled above its melting point, it transforms into a solid, snow-like mass.

Under certain thermodynamic conditions, the interaction of gaseous carbon dioxide with water results in the formation of crystalline hydrates in the form of a wet, snow-like mass.

The viscosity of a liquid is a physical quantity that determines many properties of a substance, among which the potential movement of molecules of another substance within it plays a significant role. The lower the viscosity of a liquid, all other things being equal, the more intense its ability to attract particles during diffusion and mass transfer. The influence of viscosity is determined by the cohesive forces between molecules and is closely related to the magnitude of the energy barrier that diffusing molecules must overcome.

The viscosity of liquid carbon dioxide is the lowest in comparison with the viscosity of other common solvents. Thus, at $200C$, the viscosity of liquid carbon dioxide is $6330 \text{ ppm} \cdot 107$, which is 16.7 times lower than that of water, 17.8 times lower than that of ethyl alcohol, 16 times lower than that of carbon tetrachloride, 5.5 times lower than that of n-hexane, 4.5 times lower than that of freon-12, 2.7 times lower than that of butane, and 2 times lower than that of propane (Frank-Kamensky, 1947; Staskevich et al., 1994). This comparison speaks in favor of the technical advantages of liquid carbon dioxide as a solvent with good diffusion properties [6-12].

The subcritical region is characterized by a smooth increase in density, provided that the temperature of the medium is maintained. A decrease in temperature leads to an increase in density, even with little or no increase in pressure. These factors must be taken into account when planning the use of carbon dioxide in its liquid or solid state.

The dissolving power of liquid carbon dioxide in the subcritical region is directly dependent on the density of the solvent. There are observations (Bork M., 2000; Maeyer V.S., 1999) that as the molecular weight of the dissolved substances increases, their solubility in liquid carbon dioxide increases with increasing density of the dioxide. In this situation, this is associated with a decrease in temperature. It is known that the highest solubility of a number of carotenoids and fatty acid components occurs at a temperature of $10-12^\circ C$ (Kas'yanov, Shaftan, 1997) [13-15].

Liquid carbon dioxide is highly soluble in alcohol and ether.

Liquid carbon dioxide is a moderately selective solvent for many non-polar aromatic compounds (Frencis, 1994). This is consistent with the well-known rule that like dissolves like, the solubility of non-polar compounds in the same non-polar solvent increases proportionally with the molecular weight of the solute, and, finally, low solubility implies high solvent selectivity, and vice versa. The above also applies to liquid carbon dioxide. It dissolves most terpenoids, high-molecular-weight fatty acids and their esters, phenols, coumarins, carbonyl compounds, waxes and wax-like substances, medium-molecular-weight resins, and, to some extent, alkaloids, azulenogens, ethers, and esters. Among the substances dissolved in liquid carbon dioxide, fat-soluble vitamins and provitamins such as carotenoids, tocopherols, sterols, essential fatty acids, some hormonal substances, groups of compounds with bactericidal or bacteriostatic activity, and natural phytopcides are present in significant quantities. It is also worth noting the cosolubility of a number of substances with noticeable polarity in solutions of non-polar components in liquid carbon dioxide. The latter phenomenon is widely used in extraction technology (Kas'yanov, Kvasenkov, 1998) [15-20].

In the boundary region around the critical point, the solubility of carbon dioxide drops sharply. Here, the condition clearly applies: at the transition point, the liquid's properties have already been exhausted, while the compressed gas has not yet fully acquired its properties as a working fluid.

CO₂ is used for the extraction of plant materials in the following states [9,10]:

- liquid subcritical at $t < t_{cr}$, $P < P_{cr}$;
- critical $t = t_{cr}$, $P = P_{cr}$;
- liquid supercritical $t < t_{cr}$, $P > P_{cr}$;
- gaseous supercritical $t > t_{cr}$, $P > P_{cr}$.

A substance in a supercritical state is a substance at a temperature and pressure above the critical point (a certain temperature T_{cr} and pressure P_{cr} , at which the difference between liquid and gas disappears). At the critical point, the density of the liquid and its saturated vapor become equal, and the surface tension of the liquid drops to zero, so the liquid-vapor phase boundary disappears [21].

Although the substance externally resembles a liquid, a special term is now used to describe it: supercritical fluid (from the English word fluid, meaning "capable of flowing"). In modern literature, the abbreviated designation of supercritical fluids (SCF) is accepted. A large number of

substances are capable of existing in a supercritical state; in fact, the transition to a supercritical state is limited by the decomposition temperature of the substance [21-26].

Thus, the supercritical state of a substance is a state at a temperature and pressure above critical ($T > T_{cr}$, $P > P_{cr}$), and in a confined space below critical (V_{kp}).

The properties of a substance in a supercritical state are intermediate between those of the gas and liquid phases. For example, an SCF has a high density, close to that of a liquid, and a low viscosity like gases. Thus, the density of a supercritical fluid differs slightly from that of a liquid, i.e. The fluid has significant capacity, viscosity close to that of a gas, and an intermediate diffusion coefficient, which significantly accelerates mass transfer processes. This combination of properties makes supercritical fluids extremely effective as substitutes for organic solvents in laboratory and industrial processes [27].

One of the most important properties of the supercritical state is its ability to dissolve substances.

The main advantages of supercritical fluids as solvents are [3,4,9]:

- a combination of the properties of gases at high pressures (low viscosity, high diffusion coefficient) and liquids (high dissolving power);
- rapid mass transfer due to low viscosity and high diffusion coefficient;
- a combination of negligible interfacial tension with low viscosity and a high diffusion coefficient, allowing supercritical fluids to penetrate porous media more easily than liquids;
- high sensitivity of the dissolving power of supercritical fluids to changes in pressure or temperature;
- ease of separation of supercritical fluids and their dissolved substances upon pressure release.

By varying the temperature or pressure of a fluid, its properties can be altered over a wide range. Thus, it is possible to obtain a fluid with properties similar to either a liquid or a gas. The dissolving power of a fluid increases with increasing density (at a constant temperature). Since density increases with increasing pressure, varying the pressure can influence the dissolving power of the fluid (at a constant temperature). In the case of temperature, the dependence of fluid properties is somewhat more complex: at a constant density, the dissolving power of the fluid also increases, but near the critical point, a slight increase in temperature can lead to a sharp drop in density, and, consequently, dissolving power. Supercritical fluids mix with each other without limitation, so when the critical point of

the mixture is reached, the system will always be single-phase.

In a supercritical state, as noted above, a substance expands, occupying the entire available volume like a gas, but has a high density like a liquid.

It is the unique properties of CO₂ in a supercritical state that enable its application in various industries: petrochemical, food, perfume, pharmaceutical, and others. Supercritical CO₂ (SC CO₂) exhibits faster mass movement than traditional liquid organic solvents due to its low viscosity and high diffusion coefficient (10 times higher than that of a liquid) at a density only slightly different from that of a liquid. Thus, supercritical CO₂ can penetrate the extracted material significantly better than a classic solvent, absorbing and transporting dissolved components. This property of supercritical gases is widely used in the extraction of various organic compounds. Furthermore, the solvent capacity of a fluid in the near-critical region undergoes significant changes with small changes in temperature and pressure. This, in turn, enables fractionation of the feedstock and solvent regeneration without additional energy consumption. Simply changing pressure and temperature parameters allows for the concentration of substances in the extract to be controlled. This ensures the most complete extraction of substances, while the use of carbon dioxide allows for its complete and gentle separation from the extract and carrier material, unlike conventional solvents [15-21].

The use of carbon dioxide allows for its complete and gentle separation from the extract and carrier material, unlike conventional solvents, whose removal is not always complete. In other words, extracts obtained using this method are completely solvent-free.

The energy consumption for solvent regeneration is in many cases lower than with traditional extraction. Furthermore, excess pressure in the system prevents oxygen penetration during extraction, eliminating oxidation processes.

Conclusion. The use of carbon dioxide allows for its complete and gentle separation from the extract and carrier material, unlike traditional solvents, which are not always completely removed. In other words, ingredients obtained using this method are completely solvent-free.

The energy consumption for solvent regeneration is often lower than with traditional extraction. And the excess pressure in the system prevents oxygen penetration during extraction, eliminating oxidation processes.

Based on the results of our work, we developed and manufactured a laboratory setup for CO₂ extraction research, designed for local raw

materials. The laboratory setup for studying the extraction of ingredients from plant materials using SC-CO₂ consists of a tank, a heat exchanger, a high-pressure extractor, a separator, a compressor, a condenser, a CO₂ gas cylinder, and a coil extract heater. The chemical and physical characteristics of the test subjects (local oil-containing raw materials) and target products (oils, lipid complexes) were studied. Methods for analyzing the quality of the resulting oils were determined.

References

- 1 *José M. del Valle*. Extraction of natural compounds using supercritical CO₂: Going from the laboratory to the industrial application // *Journal of Supercritical Fluids*. Volume 96. January 2015. Pages 180-199
- 2 *Rahoma S. Mohamed, G. Ali Mansoori*. The Use of Supercritical Fluid Extraction Technology in Food Processing // *Food Technology Magazine*, June 2002. The World Markets Research Centre, London, UK
- 3 *Pourmortazavi SM, Hajimirsadeghi SS*. Supercritical fluid extraction in plant essential and volatile oil analysis. // *Journal Chromatogr A*. 2007 Sep 7; #1163(1-2): p.2-24
- 4 *Fornari T., Vicente G., Vázquez E., García-Risco MR., Reglero G*. Isolation of essential oil from different plants and herbs by supercritical fluid extraction.// *J Chromatogr A*. 2012 Aug 10;#1250: p.34-48.
- 5 *Vodyanik A. R., Shadrin A. Yu., Sinev M. Yu*. Supercritical fluid extraction of natural raw materials: world experience and the situation in Russia // "Supercritical Fluids: Theory and Practice", Vol. 3. No. 2. 2008, pp.58-69.
- 6 Supercritical CO₂ extraction - possibilities and prospects// *Lepeshkov A.G., Vodyanik A.R., Averin K.M*. Research Center of Ecological Resources "GORO", Rostov-on-Don. <http://www.extract.ru/index.php?id=91>
- 7 *Zalepugin D. Yu., Tiikunova N. A., Chernyshova I. V., Polyakov V. S*. Development of technology based on the use of supercritical fluids // "Supercritical Fluids: Theory and Practice", Vol. 1, No. 1, 2006, pp. 27-51.
- 8 *Koshevoy E. P*. Carbon dioxide extraction in food technology / E. P. Koshevoy, H. R. Blagoz. - Maykop, 2000. 495 p.
- 9 *Kasyanov G. A*. Theory of gas-liquid technologies // <http://krkgi.ru/glav/co2tech/extraction.htm>
- 10 *Blagoz H. R*. Development of scientific foundations and development of processes and techniques for carbon dioxide extraction in the food industry. // Diss. for the degree of Doctor of Technical Sciences - Krasnodar, 2002, 390 p.
- 11 *Díaz-Maroto MC., Pérez-Coello MS., Cabezudo MD*. Supercritical carbon dioxide extraction of volatiles from spices. Comparison with simultaneous distillation-extraction. // *J. Chromatogr A*. 2002 Feb 15; #947(1): p.9-23.
- 12 *Mirzaeva Sh. U., Muxamadiev V. T*. Perspective Theoretical Foundations of the Extraction Process, Sulfur Dioxide Chemistry and Environmental Impact, 2024, IntechOpen.
- 13 *Gafurov K.Kh., Mukhammadiev B.T., Mirzaeva Sh.U*. Supercritical [SC] CO₂

Extraction of Glycyrrhizic Acid from Licorice Roots, Butlerov Communications No. 1, Vol. 49. 2017, Tatarstan, pp. 108-114.

14 *Mirzaeva Sh.U., Gafurov K.Kh., Zhumaev Zh.* Certificate of official registration of the program for electronic computers. Computer program Optimization of the process of obtaining CO₂ extract from licorice root. DGU 09833 (2021)

15 *Gafurov K.X., Muxammadiyev B.T., Kuldosheva F.S.* Obtaining extracts from plant raw materials using carbon dioxide, Food Science and Technology, Scientific and Production Journal Odessa, Vol. 14 No. 1 (2023), Web of science journal.

16 *Khalilov I., Abdullayeva F., Xodjiyeva N., Mirzaeva S.* Optimization of the process CO₂ - extraction of plant raw material, BIO Web of Conferences 141, 01030 (2024) AGRICULTURAL SCIENCE 2024.

17 *Mirzaeva S., Yuldoshov L., Xodjiyeva N.* CO₂ - extraction of glycyrrhizic acid from licorice root: optimization of extraction conditions using RSM, BIO Web Conferences 113, 01004 <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411301004>.

18 *Akselrud G.A., Lysyansky V.M.* Extraction (solid-liquid system). - L.: Chemistry, 1974.-256 p.

19 Processes and equipment for food production. Stabnikov N.S., Popov V.D., Lysyansky V.M., Redko F.A. - Moscow: Food Industry, 1976.-663 p.

20 *Lobanov V.G., Shcherbakov V.G.* Biochemistry and commodity science of oilseed raw materials. - Moscow: KolosS, 2012.-360 p.

21 Supercritical state of matter: fluids and supercritical fluid technologies. Source - "<http://ru.wikipedia.org/wiki/>" Categories: Thermodynamics | Chemical technology
22 *Kasyanov G.I.* Technology of CO₂ processing of plant raw materials (Theory and practice). Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the form of a scientific report. Moscow: Russian Agricultural Academy, 1994.

23 <http://www.comodity.ru/nonsoftalco/carbondioxide/22.html>

24 <http://techlekform.ru/tehnologiya-summarnyih-galenovyyih-preparatov/ekstraktyi/primeneniye-szhizhennogo-uglekisloga-gaza-dlya-polucheniya-ekstr.html> Categories: Thermodynamics | Chemical Engineering

25 <http://www.comodity.ru/nonsoftalco/carbondioxide/22.html>

26 https://ru.wikipedia.org/wiki/Диоксид_проблемы

27 *Ozmen S.* Characterization and refining of black cumin oil by supercritical carbon dioxide extraction. Proc. 8 th city Bodeaux 1, -2002.

¹*Халилов И.М.,* ²*Мухамадиев Б.Т.,* ³*Халилова Ф.М.,* ³*Мирзаева Ш.У.,*
³*Исомова И.П.*

¹ Ўзбекистан Республикасы Ғылым Академиясының микробиология институты, Бўқара қ., Ўзбекистан

² Бўқара мемлекеттік техникалық университеті, Бўқара қ., Ўзбекистан

³ Бўқара мемлекеттік университеті, Бўқара қ., Ўзбекистан

ӨСІМДІК ШИКІЗАТЫНАН ИНГРЕДИЕНТТЕРДІ АЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Түйіндеме. Мақалада көмірқышқыл газын экстракциялаудың шолу материалдары, өсімдік шикізатынан заттарды алу процесінің ерекшеліктері, сұйық

көмірқышқыл газының өсімдік шикізатынан ингредиенттер алу үшін еріткіш ретіндегі қасиеттеріне талдау жасалады. Мақала тамақ және қайта өңдеу өнеркәсібі салаларының, сондай-ақ фармацевтика саласының ғылыми және инженерлік-техникалық қызметкерлеріне арналған. Фармацевтика, парфюмерия және тамақ өнеркәсібінде жаңа сапалы өнімдер алуға мүмкіндік беретін энергия-ресурс үнемдеу технологияларының әдістерін дамыту жоғары сапалы дәрі-дәрмектер мен азық-түлікке, сондай-ақ экологиялық таза өндірістерге деген қоғамдық қажеттілікке байланысты болып отыр.

Бұл мәселенің шешімдерінің бірі сұйытылған және сығылған көмірқышқыл газын экстрагент ретінде қолдану болып табылады. Сұйытылған күйдегі көмірқышқыл газын алу бөлінетін биологиялық белсенді қосылыстардың спектрін едәуір кеңейтеді, сонымен қатар басқа белгілі экстракция әдістерінің ешқайсысын ала алмайтын соңғы өнімдегі биологиялық белсенді заттардың концентрациясын алуға мүмкіндік береді. Өзбекстанның өсімдік шикізаты – жеміс тұқымдары, жүзім тұқымдары, асқабақ, қауын және т.б., құрылымының ерекшеліктері сұйық және суперкритикалық көмірқышқыл газын қолдана отырып, экстракцияның технологиялық режимдерін, экстракция процесінің кинетикасы мен динамикасын, экстракция процесінің алынған өнімнің шығымы мен сапасына әсерін анықтайды.

Түйінді сөздер: өсімдік шикізаты, өсімдік шикізатын алу, экстракцияланатын материалдың қасиеттері, биоактивті компоненттерді алу, CO₂-экстракция процесі, майлардың сапасын талдау.

* * *

Халилов И.М.¹, Мухамадиев Б.Т.², Халилова Ф.М.³, Мирзаева Ш.У.³, Исомова И.П.³

¹Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, г. Бухара, Узбекистан

²Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

³Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРАКЦИИ ИНГРЕДИЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В статье приведены обзорные материалы экстракции углекислотой, особенности процесса экстракции веществ из растительного сырья, проведен анализ свойств жидкого углекислого газа как растворителя для получения ингредиентов из растительного сырья. Статья предназначена для научных и инженерно-технических работников отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности, а также фармацевтической отрасли. Развитие методов энерго-ресурсосберегающих технологий, позволяющие получить новые качественные продукты в фармацевтической, парфюмерной и пищевой промышленности, обусловлено острой общественной потребностью на высококачественных лекарствах и в продовольствиях, а также в экологически чистых производствах. Одним из решений данной проблемы является применение в качестве экстрагента сжиженного и сжатого углекислого газа. Экстракция углекислым газом в сжиженном состоянии

существенно расширяет спектр выделяемых биологически активных соединений, а также позволяет получать такие концентрации биологически активных веществ в конечном продукте, которые невозможно получить ни одним из других известных методов экстракции. Особенности структуры растительного сырья Узбекистана - плодовых косточек, семян винограда, тыквы, дыни и др., предполагают разработки технологических режимов экстракции с применением жидкого и сверхкритического углекислого газа, кинетики и динамики процесса экстракции, определения влияния процесса экстракции на выход и качество получаемого продукта.

Ключевые слова: растительное сырьё, экстракция растительного сырья, свойства экстрагируемого материала, получение биоактивных компонентов, процесс CO₂-экстракции, анализ качества масел.

Information about the authors

Khalilov Ilkhom Mamatkulovich – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Institute of Microbiology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Bukhara c., Uzbekistan, ilkhom2002@yahoo.com

Mukhamadiev Bakhodir Timurovich – Candidate of Biological Sciences. Associate Professor of the Department of Industrial Ecology of the Bukhara State Technical University, Bukhara c., Uzbekistan, shohista.m@rambler.ru

Mirzaeva Shohista Usmonovna – Doctor of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Biotechnology and Food Safety, Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan, shohista.m@rambler.ru

Isomova Ikbolabonu Pulot kizi – master's student of Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan, qilichqalam@gmail.com

Khalilova Feruza Mamatkulovna – teacher, Bukhara State University, Department of Biology, Bukhara c., Uzbekistan, ilkhom2002@yahoo.com

Авторлар туралы мәліметтер

Халилов Илхом Маматкулович – биология ғылымдарының докторы, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясы Микробиология институтының профессоры, Бұхара қ, Өзбекстан, ilkhom2002@yahoo.com

Мұхамадиев Баходир Тимурулы – биология ғылымдарының кандидаты. Бұқара мемлекеттік техникалық университетінің Өнеркәсіптік экология кафедрасының доценті, Бұхара қ, Өзбекстан, shohista.m@rambler.ru

Мирзаева Шохиста Усмоновна – техника ғылымдарының докторы (PhD), Бұқара мемлекеттік университетінің Биотехнология және тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі кафедрасының доценті, Бұхара қ, Өзбекстан, shohista.m@rambler.ru

Исомова Икболабону Пулотқызы – Бұқара мемлекеттік университетінің магистранты, Бұхара қ, Өзбекстан, qilichqalam@gmail.com

Халилова Феруза Маматкуловна – оқытушы, Бұқара мемлекеттік университеті, Биология кафедрасы, Бұқара қ., Өзбекстан. ilkhom2002@yahoo.com

Сведения об авторах

Халилов Илхом Маматкулович – доктор биологических наук, профессор, Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, г. Бухара, Узбекистан, ilkhom2002@yahoo.com

Мухамадиев Баходир Тимурович – кандидат биологических наук, доцент, кафедра Промышленная экология, Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан, shohista.m@rambler.ru

Мирзаева Шохиста Усмоновна – доктор технических наук (PhD), доцент, кафедра Биотехнология и пищевая безопасность, Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан, shohista.m@rambler.ru

Исомова Икболабону Пулот-кизи – магистрантка, Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан, qilichqalam@gmail.com

Халилова Феруза Маматкуловна – преподаватель, Бухарский государственный университет, кафедра «Биология», г. Бухара, Узбекистан, ilkhom2002@yahoo.com

ПЕРЕВОД СТАТЬИ / МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ

**Халилов И.М.¹, Мухамадиев Б.Т.², Халилова Ф.М.³,
Мирзаева Ш.У.³, Исомова И.П.³**

¹Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан,
г. Бухара, Узбекистан

²Бухарский государственный технический университет,
г. Бухара, Узбекистан

³Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРАКЦИИ ИНГРЕДИЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В статье приведены обзорные материалы экстракции углекислотой, особенности процесса экстракции веществ из растительного сырья, проведен анализ свойств жидкого углекислого газа как растворителя для получения ингредиентов из растительного сырья. Статья предназначена для научных и инженерно-технических работников отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности, а также фармацевтической отрасли. Развитие методов энерго-ресурсосберегающих технологий, позволяющие получить новые качественные продукты в фармацевтической, парфюмерной и пищевой промышленности, обусловлено острой общественной потребностью на высококачественных лекарствах и в продовольствиях, а также в экологически чистых производствах. Одним из решений данной проблемы является применение в качестве экстрагента сжиженного и сжатого углекислого газа. Экстракция углекислым газом в сжиженном состоянии существенно расширяет спектр выделяемых биологически активных соединений, а также позволяет получать такие концентрации биологически активных веществ в конечном продукте, которые невозможно получить ни одним из других известных методов экстракции. Особенности структуры растительного сырья Узбекистана – плодовых косточек, семян винограда, тыквы, дыни и др., предполагают разработки технологических режимов экстракции с применением жидкого и сверхкритического углекислого газа, кинетики и динамики процесса экстракции, определения влияния процесса экстракции на выход и качество получаемого продукта.

Ключевые слова: растительное сырьё, экстракция растительного сырья, свойства экстрагируемого материала, получение биоактивных компонентов, процесс CO₂-экстракции, анализ качества масел.

Введение. Основным технологическим процессом, позволяющим извлекать биологически активные компоненты из растительного сырья, является экстракция. Экстракция (от позднелат. *extractio* – извлечение) - процесс извлечения веществ из растворов или сухой смеси с помощью избирательных (селективных) растворителей (экстрагентов), не смешивающиеся с этим раствором, но в которых вещество растворяется лучше, чем в первом растворителе [1]. В обычном процессе экстрагирования в системе «жидкость + твердое тело» происходит массопередача, характеризующаяся переходом одного или нескольких веществ из одной фазы (сырья) в другую (экстрагент) путем диффузии. Различают диффузию: 1) молекулярную и 2) конвективную.

Молекулярной диффузией называется обусловленный хаотическим движением молекул процесс постепенного взаимного проникновения веществ (жидких или газообразных), граничащих друг с другом и находящихся в макроскопическом покое. Интенсивность диффузии зависит от кинетической энергии молекул. Чем она выше, тем интенсивнее протекает диффузионный процесс. Например, газы легко диффундируют друг в друга, поскольку молекулы их движутся с большими скоростями. Жидкости и растворы, движение молекул в которых более ограничено, диффундируют значительно медленнее [2].

Материалы и методы исследований. Движущей силой диффузионного процесса является разность концентраций растворенных веществ в соприкасающихся жидкостях. Чем больше будет разница концентраций, тем большее количество вещества переместится при всех прочих равных условиях за одно и то же время. Скорость диффузии увеличивается при повышении температуры, поскольку при этом возрастает скорость движения молекул. Скорость диффузии зависит от относительной молекулярной массы вещества. На диффузионный процесс, естественно, влияет величина поверхности, разделяющей вещества, а также толщина слоя, через который происходит диффузия. Очевидно, чем больше поверхность раздела, тем больше про диффундируют вещества, и чем толще слой, тем медленнее идет выравнивание концентрации. Наконец, перемещение вещества требует определенного времени. Чем дольше длится диффузия, тем больше вещества переходит из одной среды в другую [1]. **Цель исследований** - анализ обзорных материалов по экстракции углекислотой и экстракции веществ из растительного сырья.

Влияние факторов на процессы диффузии может быть выражено математически следующим уравнением:

$$\frac{dM}{d\tau} = DF \frac{y_{\text{нас}} - y}{d}, \quad (1.1)$$

где dM – количество продиффундировавшего вещества за время диффузии $d\tau$; $y_{\text{нас}} - y$ – разность концентраций; F – поверхность раздела фаз; d – толщина слоя, через который происходит диффузия; D – коэффициент молекулярной диффузии, показывающий количество вещества в кг, которое продиффундирует за 1 с через поверхность в 1 м^2 , при толщине слоя 1 м и разности концентраций в 1 кг/м^3 .

Согласно этому уравнению, называемому *законом диффузии Фика*, количество про- диффундировавшего вещества прямо пропорционально разности концентраций, поверхности раздела фаз, времени диффузии, коэффициенту диффузии и обратно пропорционально толщине слоя [2].

Что касается коэффициента диффузии, то его математическое выражение было дано А. Эйнштейном:

$$D = \frac{RT}{N_0} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r}, \quad (1.2)$$

где R – газовая постоянная $8,32 \text{ Дж/(град}\cdot\text{моль)}$; T – абсолютная температура; N_0 – число Авогадро ($6,06 \cdot 10^{23}$); η – вязкость в $\text{н/(с}\cdot\text{м}^2)$; r – радиус диффундирующих частиц в м.

Из приведенного уравнения видно, что коэффициент диффузии увеличивается с повышением температуры и уменьшается с увеличением вязкости среды и размера частиц вещества. Иначе говоря, чем меньше радиус диффундирующих частиц, тем быстрее идет диффузия. Например, растворы белков, слизи и т.п. диффундируют очень медленно, потому что они как высокомолекулярные соединения имеют очень низкие коэффициенты диффузии. Совершенно другая картина наблюдается в растворах веществ, находящихся в состоянии молекулярной или ионно-молекулярной дисперсии. Эти вещества как имеющие относительно малые размеры частиц диффундируют несравнимо быстрее.

В практике численные значения коэффициентов молекулярной диффузии берут из справочников или специально рассчитывают.

В ядре потока вещество перемещается к границе раздела фаз главным образом за счет перемещения молярных (состоящих из

большого количества молекул) частей среды, т.е. *конвективной диффузии*. В пограничном слое — за счет молекулярной диффузии. Суммарный перенос вещества от границы (или к границе) раздела фаз носит название *массоотдачи* [2].

Скорость процесса в этом случае:

$$\frac{dM}{dt} = \beta F (y_{\text{нас}} - y_{\text{ср}}) \quad (1.3)$$

где β -коэффициент конвективной диффузии, представляющий собой количество вещества, переносимое за 1 с через поверхность в 1 м^2 , при разности концентраций, равной 1 кг/м^3 ; F – поверхность раздела фаз; $y_{\text{нас}} - y_{\text{ср}}$ – разность между концентрации насыщения раствора и средней концентрации в основной массе.

Конвективный перенос вещества происходит в результате сотрясения, изменения температуры, перемешивания и т.д., т.е. причин, вызывающих перемещение жидкости, а вместе с ней и растворенного вещества в турбулентном потоке. Иначе говоря, механизм конвективной диффузии состоит в переносе вещества в виде отдельных небольших объемов его раствора, причем внутри этих малых объемов имеет место и молекулярная диффузия.

Конвективная диффузия подчиняется закону (1.3), согласно которому скорость конвективной диффузии возрастает с увеличением поверхности контакта фаз, разности концентраций, продолжительности процесса и коэффициента конвективной диффузии.

При конвективной диффузии размер молекул диффундирующего вещества, вязкость растворителя, кинетическая энергия молекул становятся второстепенными. Главными для скорости конвективного переноса вещества становятся гидродинамические условия, т.е. скорость и режим движения жидкости. Таким образом, молекулярный и конвективный переносы вещества отличаются друг от друга не только механизмом, но и тем, что скорость их протекания зависит от разнородных групп факторов. Обычно скорость конвективного переноса веществ во много раз больше скорости молекулярного переноса.

Разбираемые положения, приведенные выше, относятся к так называемой свободной диффузии, т.е. к такому случаю, когда между соприкасающимися растворами или жидкостями нет никаких перегородок, иначе говоря, когда молекулярная и конвективная диффузии протекают свободно, не встречая на своем пути каких-либо преград.

А при экстрагировании ингредиентов из растительного сырья с пористой структурой идет диффузия веществ из внутренних структур частицы материала и процесс извлечения веществ осложняется рядом особенностей [2].

Основу структуры растительных веществ, подвергаемых экстракции, составляют капиллярно-пористые системы [2].

Ткани, из которых состоят масличные плоды и семена, состоят из сотен клеток, являющихся основными функциональными единицами высших растений. Между клетками разных по специализации тканей прослеживается существенное различие. Это различие позволяет, пользуясь морфологическими признаками, устанавливать принадлежность ткани и ее специализацию, а иногда и вид растения [3].

Специализация основной ткани обуславливает развитие в них внутриклеточных структур, обеспечивающих синтез запасных веществ клетки. В то же время отдельно взятые клетки, различаясь по форме, величине и химическому составу в зависимости от физиологических функций ткани, вида масличного растения и возраста, сохраняют единый для растительной клетки план строения (рисунок 1):

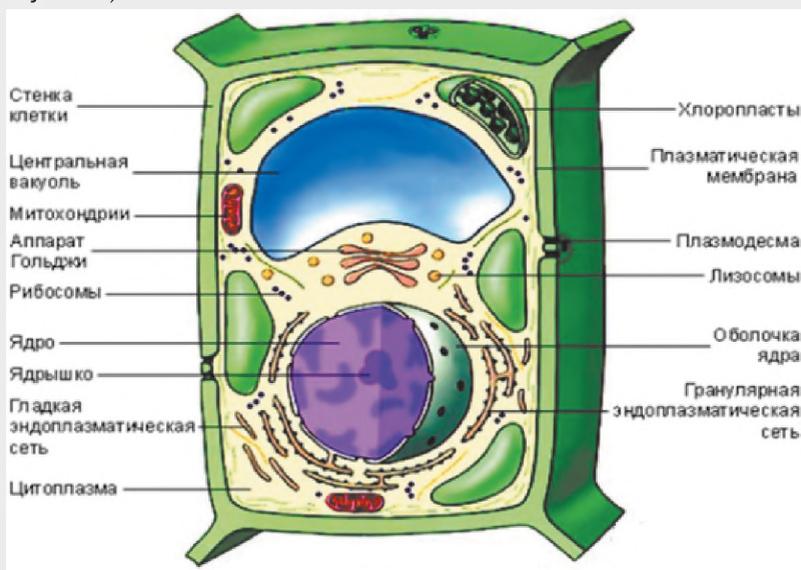


Рисунок 1 - Схема строения растительной клетки [3].

Специфической особенностью растительной клетки является наличие у нее оболочки, не способной пропускать твердые частицы. Твердая оболочка клетки, приобретенная растениями еще на очень ранних ступенях эволюции, обеспечивала необходимую защиту внутриклеточного содержимого, но обусловила также специфику питания растения – из окружающей среды в клетку питательные вещества могут попасть только в растворенном состоянии [3].

Под оболочкой клетки расположена цитоплазма, в нее погружены ядро клетки и многочисленные органоиды различного строения и функций (рисунок 1). При наблюдении в оптический микроскоп цитоплазма растущих растительных клеток, например при созревании или прорастании семян, представляет собой прозрачную полужидкую массу зернистого строения, в которой видны отдельные органоиды. Ядро в молодой клетке располагается в центре, а у взрослой – вблизи клеточной стенки.

Характерной особенностью растительной клетки является наличие жесткой (твердой) клеточной стенки. Клеточная оболочка определяет форму клетки, придает клеткам и тканям растений механическую прочность и опору, защищает цитоплазматическую мембрану от разрушения под влиянием гидростатического давления, развиваемого внутри клетки. Однако такую оболочку нельзя рассматривать только как механический каркас.

Клеточная оболочка обладает такими свойствами, которые позволяют противостоять давлению воды внутри клетки, и в то же время обладает растяжимостью и способностью к росту. Она является противоинфекционным барьером, принимает участие в поглощении минеральных веществ, являясь своеобразным ионообменником. В состав клеточной оболочки входят целлюлоза, гемицеллюлозы, пектиновые вещества, липиды и небольшое количество белка. Компоненты клеточной оболочки являются продуктами жизнедеятельности клетки. Они выделяются из цитоплазмы и претерпевают превращения на поверхности плазмалеммы. Первичные клеточные стенки содержат из расчета на сухое вещество: 25% целлюлозы, 25% гемицеллюлозы, 35% пектиновых веществ и 1-8% структурных белков. Однако цифры весьма колеблются. Так, в состав клеточных стенок колеоптилей злаков входит до 60-70% гемицеллюлоз, 20-25% целлюлозы, 10% пектиновых веществ. Вместе с тем клеточные стенки эндосперма содержат до 85% гемицеллюлоз. Во вторичных клеточных стенках больше целлюлозы. Остов клеточ-

ной оболочки составляют переплетенные микро- и макрофибриллы целлюлозы. Целлюлоза, или клетчатка ($C_6H_{10}O_5$) $_n$, представляет собой длинные неразветвленные цепочки, состоящие из 3-10 тыс. остатков D-глюкозы, соединенных β -1,4-гликозидными связями. Молекулы целлюлозы объединены в мицеллу, мицеллы объединены в микрофибриллу, микрофибриллы объединены в макрофибриллу. Макрофибриллы, мицеллы и микрофибриллы соединены в пучки водородными связями. Диаметр мицеллы составляет 5 нм, диаметр микрофибриллы – 25-30 нм, макрофибриллы – 0,5 мкм. Структура микро- и макрофибрилл неоднородна [2].

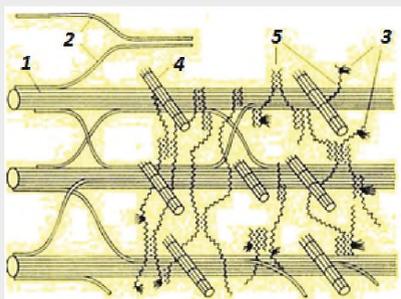


Рисунок 2 - Структура клеточной стенки (по Nach Lucasund Wolf,1993) [2]
1-микрофибриллы целлюлозы; 2-гемицеллюлоза; 3- рамногалактуронан;
4-белок экстензии; 5-пектиновые вещества.

Метод извлечения масла механическим способом заключается в том, что измельчение сырья необходимо для частичного разрушения клеточной структуры, а также для улучшения процесса дальнейшей его влаготепловой обработки.

Однако, после измельчения, максимальный проход через 1 мм сита составляет 60%, тогда как для хлопковой мятки размеры растительной клетки по данным [3] составляют 33,5x17,5 мкм, для сои 75,0x24,4 мкм, для подсолнечника 45,5x30,0 мкм, а толщина клеточной стенки маслосодержащих тканей находится в пределах от 0,9 до 1,3 мкм. В связи с этим при влажности ядра 9– 10% вальцеванием не обеспечивается максимальное разрушение клеточной структуры, а длительная влаготепловая обработка ухудшает качество масла и других компонентов ядра.

Все эти структурные элементы растительной клетки создают препятствие для диффузии веществ, растворенных в вакуоли.

В процессе извлечения преобладают диффузионные (массообменные) явления, основанные на выравнивании концентрации между растворителями (экстрагент) и раствором веществ, содержащихся в клетке.

Особенности извлечения веществ из материалов с клеточной структурой связаны с тем, что на пути к веществам, содержащимся в клетке, находится клеточная стенка, физиологическое состояние которой может быть различным. Так, живая растительная клетка имеет пристенный слой протоплазмы определенной толщины (рисунок 2). Он накладывает особый отпечаток на свойства клеточной стенки, как перегородки, отделяющей раствор внутри клетки (клеточный сок) от жидкости вне клетки.

Пока протоплазма не разрушена (денатурирована), клеточная стенка является полупроницаемой перегородкой, не пропускающей наружу вещества, растворенные в клеточном соке. Перенос вещества внутри ткани происходит с ничтожно малой скоростью. В этом случае возможно лишь проникновение экстрагента внутрь клетки (осмос). Поэтому растительная ткань, в клетках которой протоплазма не разрушена, должна перед проведением процесса экстракции или в начальной его стадии подвергаться специальной обработке (дроблению, нагреванию, замораживанию, ферментации и др.).

После такой обработки основное диффузионное сопротивление создают клеточные оболочки растительной ткани. Микрофибриллы и макрофибриллы, составляющие основу клеточных оболочек, сложным образом переплетаются между собой и образуют разного размера поры (от 0,5 нм до 20-25 нм), через которые осуществляется основной транспорт вещества из клетки (рисунок 2 и 3). Микрофибриллы в свою очередь построены из пачек макромолекул целлюлозы (рисунки 2 и 4).

Благодаря малому размеру пор клеточных оболочек и самих клеток (5-50 мкм) вещество в жидкости, заполняющей поры, переносится исключительно за счет молекулярной диффузии. Суммарная площадь сечения пор, через которую происходит процесс переноса, меньше, чем общая площадь сечения частицы в рассматриваемой плоскости, путь диффузии больше (из-за извилистости пор), кроме того, дополнительное сопротивление возникает из-за более частого соударения частиц со стенками пор. Поэтому скорость диффузии в твердой частице меньше, чем в чистой жидкости. Таким образом, коэффициент молекулярной диффузии в растительной ткани (так

называемый коэффициент стесненной диффузии), который точнее следовало бы называть *коэффициентом массопроводности*, будет численно меньшим, чем в соответствующем растворе, находящемся в свободном состоянии.

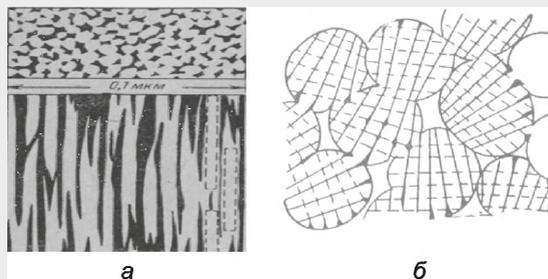


Рисунок 3 – Схема структуры целлюлозной оболочки растительной клетки [2].
а – поперечный и продольный разрезы пучка макрофибрилл;
б – поперечный разрез в большом увеличении.

Вследствие гибели протоплазмы (плазмолиза) клеточная стенка теряет характер полупроницаемой перегородки и начинает пропускать вещества в обе стороны (диализ). То есть клеточная стенка приобретает свойства пористой перегородки, через которую могут диффундировать биологически активные вещества, молекулы которых не превышают размера пор.

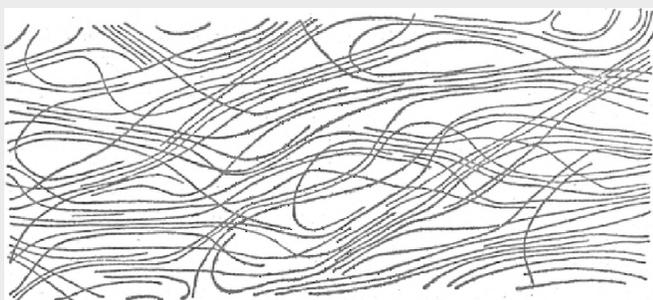


Рисунок 4 - Схема строения пачки макромолекул [2].

Наконец, имеется еще одна существенная особенность - явление десорбции, наблюдаемое в клетке после проникновения в нее экстрагента. Поскольку вещества внутри клетки связаны силами

притяжения, то необходимо прежде всего преодоление этих адсорбционных сил.

Представим в виде схемы (рисунок 5) частичку материала, находящуюся в экстрагенте, и обозначим среднюю концентрацию экстрагируемых веществ внутри частицы y_1 , а на ее поверхности – y_2 .

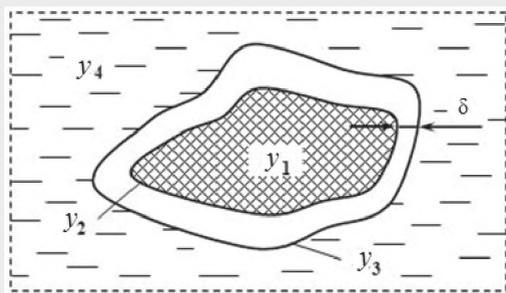


Рисунок 5 - Частица сырья в экстрагенте (схема)

Тогда количество продиффундировавшего вещества из внутренних структур частицы на ее поверхность (первая стадия) пропорционально его коэффициенту внутренней диффузии $D_{\text{вн}}$, поверхности частицы материала F , времени t , разности концентрации внутри частицы y_1 и на ее поверхности y_2 , обратно пропорционально размеру частиц растительного сырья l и может быть записано в виде уравнения:

$$dM = D_{\text{вн}} F \frac{y_1 - y_2}{l} dt \quad (1.4)$$

где $D_{\text{вн}}$ – коэффициент внутренней диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; F – поверхность раздела фаз, м^2 ; l – толщина частицы материала, через которую диффундируют вещества m ; y_1, y_2 – концентрация вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для выражения коэффициента диффузии в порах растительного материала в уравнение А. Эйнштейна (1.2) для свободной диффузии вводят поправочный коэффициент B , учитывающий все осложнения процесса. Уравнение коэффициента внутренней диффузии в этом случае будет иметь вид:

$$D_{\text{вн}} = \frac{RT}{N_0} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r} B, \quad (1.5)$$

Для материала с клеточной структурой значение коэффициента внутренней диффузии значительно меньше, чем значение коэффициента свободной диффузии. Так, величина коэффициента свободной диффузии для многих природных соединений находится в пределах 10^{-4} - 10^{-5} м²/с. Для этих же соединений значение коэффициента диффузии в порах материала с клеточной структурой на 2-3 порядка меньше, т.е. 10^{-6} - 10^{-8} м²/с [1].

На второй стадии идет диффузия веществ от поверхности частицы, (концентрация y_2) к наружной поверхности диффузионного пограничного слоя (концентрация y_3). В настоящее время общепризнано существование на поверхности кусочков сырья пристенного слоя экстрагента, называемого диффузионным пограничным слоем. Пограничный диффузионный слой оказывает большое сопротивление дальнейшему переносу экстрагируемых веществ в экстрагент. Толщина этого слоя зависит от гидродинамики процесса и, в основном, от скорости перемешивания экстрагента. Чем больше скорость перемешивания, тем меньше толщина пограничного слоя. В пределах диффузионного пограничного слоя δ перенос веществ осуществляется по закону свободной диффузии и может быть записан в виде первого закона Фика (1.1):

$$\frac{dM}{d\tau} = DF \frac{(y_{\text{нас}} - y_{\text{ср}})}{\delta}$$

Далее происходит перенос экстрагируемого вещества, движущимся экстрагентом от поверхности раздела фаз и распределение его по всей массе экстрагента (конвективная диффузия).

Если обозначить среднюю концентрацию экстрагента в объеме, омывающем частичку, через y_4 , то количество вещества, перенесенного в экстрагент за счет конвективной диффузии, может быть вычислено из уравнения (1.3).

Обычно коэффициент конвективной диффузии β во много раз больше коэффициента молекулярной диффузии D .

Суммарный процесс переноса вещества из частицы материала в экстрагент выражается основным уравнением массопередачи:

$$M = K_y F (y - y^*), \quad (1.6)$$

где y^* – равновесная концентрация в данной фазе, соответствующая концентрации распределяемого вещества в основной массе (ядре)

другой фазы; K_y – коэффициент массопередачи (м/с), который учитывает все величины, являющиеся количественными характеристиками трех стадий процесса экстракции и определяется из уравнения:

$$K_y = \frac{1}{\frac{l}{D_{\text{вн}}} + \frac{\delta}{D} + \frac{1}{\beta}} \quad (1.7)$$

Коэффициент диффузии зависит от температуры, концентрации, структуры материала, физических свойств экстрагируемого материала и растворителя.

Характеристика углекислого газа как растворителя. *Диоксид углерода (Carbon dioxide)*. Другие названия – углекислый газ, углекислота, двуокись углерода, угольный ангидрид, сухой лед (твердый). Формула – CO_2 . Бесцветный газ со слегка кисловатым запахом и вкусом. Молярная масса 44,0095(14) г/моль; в твердом виде – сухой лед; вид – бесцветный газ; номер CAS; свойства: плотность и фазовое состояние 1,98 кг/м³, при н.у.; 771 кг/м³, жидкий; 1512 кг/м³, твердый; растворимость в воде 1.45 кг/м³; удельная теплота плавления 25,13 кДж/моль; точка плавления -57°C (216 К), под давлением; точка кипения -78°C (195 К), возгоняется; константа диссоциации кислоты (рКа) 6,35 и 10,33; вязкость 0,07 пз при -78°C ; строение: форма молекулы – линейная, симметричная $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ с расстоянием $\text{C}=\text{O}$ равным 1,162 А; химические связи между атомами молекулы ковалентны и полярны; дипольный момент равен нулю; кристаллическая решётка кварцевидная [4,5]. Диоксид углерода не токсичен, но не поддерживает дыхание. Большая концентрация в воздухе вызывает удушье (гиперкапния), недостаток углекислого газа тоже опасен (гипокапния). Концентрация углекислого газа в атмосфере Земли составляет 0,038%.

Обезвоженный диоксид углерода, как газообразный, так и жидкий не корродирует металлы, но при обводнении может вызывать довольно сильную коррозию.

Диоксид углерода не горюч и не поддерживает горения вследствие того, что снижает концентрацию кислорода в месте горения. В высоких концентрациях он не поддерживает и дыхательные процессы, что может быть использовано, как стерилизующий фактор.

Химические свойства [6-8]. По химическим свойствам диоксид углерода относится к кислотным оксидам. При растворении в воде

образует угольную кислоту. Реагирует со щелочами с образованием карбонатов.

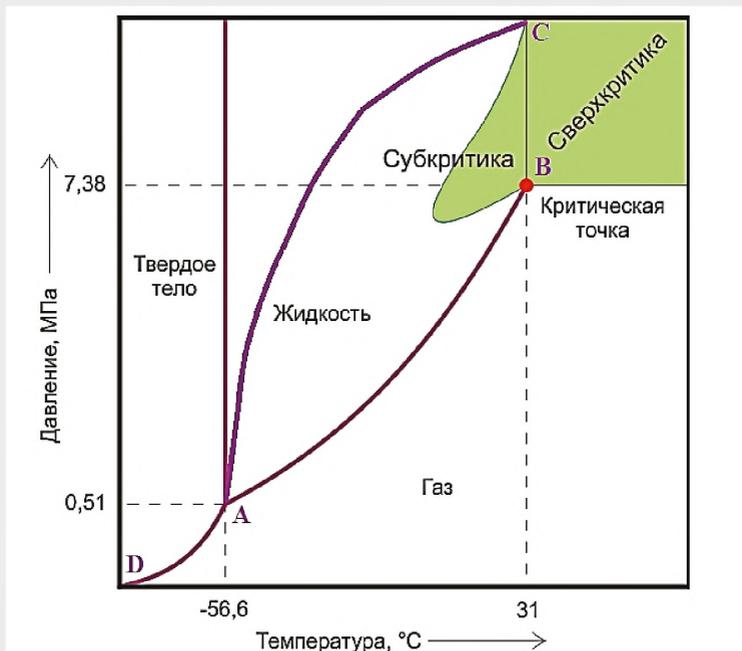


Рисунок 6 – Диаграмма фазового равновесия CO₂:
(A – тройная точка, B – критическая точка)

Из диаграммы фазового равновесия диоксида углерода следует, что данное вещество имеет довольно высокую тройную точку A. Ее характеризуют: $t_m = -56,57 \pm 0,01^\circ\text{C}$, $P_m = 518,6 \pm 3 \text{ кПа}$, $r_m = 1501 \pm 9 \text{ кг/м}^3$ [6].

Критическая точка низка (B). Ее параметры: $t_{кр} = 31,05 \pm 0,02^\circ\text{C}$, $P_{кр} = 7383 \pm 5 \text{ кПа}$, $r_{кр} = 468,16 \pm 3 \text{ кг/м}^3$ [1-5].

При атмосферном давлении и комнатной температуре диоксид углерода существует только в виде газа. Под действием давления в области температур от $-56,6$ до $31,1^\circ\text{C}$ он легко сжимается. При охлаждении до температуры ниже тройной точки или дросселировании в области выше линии плавления он трансформируется в твердую снегообразную массу.

При определенных термодинамических условиях в результате

взаимодействия диоксида углерода в газообразном состоянии с водой образуются кристаллогидраты в виде влажной снегообразной массы.

Вязкость жидкости – физическая величина, обуславливающая многие свойства вещества, среди которых немаловажную роль играет возможное передвижение молекул другого вещества в ней. Чем ниже вязкость жидкости при прочих равных условиях, тем интенсивнее проявляются ее захватывающие способности при диффузии и массопереносе. Влияние вязкости обусловлено силами сцепления между молекулами и тесно связано с величиной энергетического барьера, который необходимо преодолеть диффундирующим молекулам.

Вязкость жидкого диоксида углерода в сравнении с вязкостью других распространенных растворителей является наименьшей. Так при 20°C вязкость жидкого диоксида углерода составляет $6330 \text{ пз} \cdot 10^7$, что меньше вязкости воды в 16,7 раз, этилового спирта – в 17,8 раз, четыреххлористого углерода – в 16 раз, н-гексана – в 5,5 раза, фреона-12 – в 4,5 раза, бутана – в 2,7 раза, пропана – в 2 раза (Франк-Каменский, 1947; Стаскевич и др., 1994). Подобное сравнение говорит в пользу технических преимуществ жидкого диоксида углерода, как растворителя, с хорошими диффузионными возможностями [6-12].

Для докритической области характерно плавное увеличение плотности при условии сохранения температуры среды. Понижение температурного поля влечет за собой рост плотности даже при незначительном повышении давления или же без него. Эти обстоятельства необходимо учитывать при планировании условий использования диоксида углерода в жидком или твердом состоянии.

Растворяющая способность жидкого диоксида углерода в докритической области находится в прямой зависимости от плотности растворителя. Имеются наблюдения (Bork M., 2000; Mayer B.C., 1999), что по мере увеличения молекулярной массы растворяемых веществ их растворимость в жидком диоксиде углерода возрастает с увеличением плотности диоксида. В данной ситуации это связано с понижением температуры. Известно, что наибольшая растворимость ряда каротиноидов, жирно-кислотных компонентов приходится на температуру 10-12°C (Касьянов, Шафтан, 1997) [13-15].

Жидкий диоксид углерода хорошо растворяется в спирте и эфире.

Жидкий диоксид углерода является избирательным растворителем средней силы для многих неполярных ароматических веществ (Frensis, 1994). При этом действует известное правило, согласно которому подобное растворяется в подобном, растворимость неполярных соединений в одном и том же неполярном растворителе повышается соразмерно с ростом молекулярной массы растворяемого вещества и, наконец, малая способность растворения означает высокую селективность растворителя и наоборот. Вышесказанное полностью относится и к жидкому диоксиду углерода. В нем растворяются большинство терпеноидов, высокомолекулярные жирные кислоты и их эфиры, фенолы, кумарины, карбонильные соединения, воски и воскоподобные вещества, смолы со средней молекулярной массой, частично алкалоиды, азуленогены, простые и сложные эфиры. Среди растворяемых в жидком диоксиде углерода веществ в заметных количествах присутствуют жирорастворимые витамины и провитамины, такие как каротиноиды, токоферолы, стерины, незаменимые жирные кислоты, некоторые гормональные вещества, группы соединений с бактерицидной или бактериостатической активностью, естественные фитопциды. Стоит отметить и сорастворимость ряда веществ с заметной полярностью в растворах неполярных компонентов в жидком диоксиде углерода. Последнее явление широко используется в экстракционной технологии (Касьянов, Квасенков, 1998) [15-20].

В приграничной области вокруг критической точки резко падает растворяющая способность диоксида углерода. Здесь, очевидно, действует условие, когда в переходный момент свойства жидкости уже исчерпали себя, а сжатый газ еще не обрел свойств рабочего агента в полной мере.

Для экстракции растительного сырья CO_2 используется в следующих состояниях [9,10]:

- жидком докритическом при $t < t_{кр}$, $P < P_{кр}$;
- критическом $t = t_{кр}$, $P = P_{кр}$;
- жидком сверхкритическом $t < t_{кр}$, $P > P_{кр}$;
- газообразном сверхкритическом $t > t_{кр}$, $P > P_{кр}$.

Веществом в сверхкритическом состоянии называют вещество при температуре и давлении выше критической точки (определенной температурой $T_{кр}$ и давлением $P_{кр}$, при которых исчезает

различие между жидкостью и газом). В критической точке плотность жидкости и её насыщенного пара становятся равны, а поверхностное натяжение жидкости падает до нуля, потому исчезает граница раздела фаз жидкость-пар [21].

Несмотря на то, что внешне вещество напоминает жидкость, в применении к нему сейчас используется специальный термин – **сверхкритический флюид** – *supercritical fluid* (от английского слова *fluid*, то есть «способный течь»). В современной литературе принято сокращенное обозначение сверхкритических флюидов – СКФ. В сверхкритическом состоянии способны находиться большое количество веществ, фактически переход в сверхкритическое состояние ограничен температурой разложения вещества [21-27].

Таким образом сверхкритическое состояние вещества – это состояние при температуре и давлении выше критических ($T > T_{кр}$, $P > P_{кр}$), в замкнутом объеме меньше критического ($V_{кр}$).

Свойства вещества в сверхкритическом состоянии промежуточные между его свойствами в газовой и жидкой фазе. Так, СКФ обладает высокой плотностью, близкой к жидкости, и низкой вязкостью как газы. Так, плотность сверхкритического флюида незначительно отличается от плотности жидкости, т.е. флюид обладает значительной емкостью, вязкость близка к вязкости газа, коэффициент диффузии имеет промежуточное значение, что существенно ускоряет процессы массопереноса. Такое сочетание свойств делает чрезвычайно эффективным использование сверх критических флюидов в качестве заменителей органических растворителей в лабораторных и промышленных процессах [27].

Одно из наиболее важных свойств сверхкритического состояния – это способность к растворению веществ. Основными преимуществами сверхкритических флюидов как растворителей являются [3,4,9]:

- сочетание свойств газов при высоких давлениях (низкая вязкость, высокий коэффициент диффузии) и жидкостей (высокая растворяющая способность);
- быстрый массоперенос, осуществляемый благодаря низкой вязкости и высокому коэффициенту диффузии;
- сочетание пренебрежимо малого межфазного натяжения с низкой вязкостью и высоким коэффициентом диффузии, позволяющее сверхкритическим флюидам проникать в пористые среды более легко по сравнению с жидкостями;

- высокая чувствительность растворяющей способности СКФ к изменению давления или температуры;
- простота разделения сверхкритических флюидов и растворённых в них веществ при сбросе давления.

Изменяя температуру или давление флюида можно менять его свойства в широком диапазоне. Так, можно получить флюид, по свойствам близкий либо к жидкости, либо к газу. Растворяющая способность флюида увеличивается с увеличением плотности (при постоянной температуре). Поскольку плотность возрастает при увеличении давления, то меняя давление можно влиять на растворяющую способность флюида (при постоянной температуре). В случае с температурой зависимость свойств флюида несколько более сложная — при постоянной плотности растворяющая способность флюида также возрастает, однако вблизи критической точки незначительное увеличение температуры может привести к резкому падению плотности, и, соответственно, растворяющей способности. Сверхкритические флюиды неограниченно смешиваются друг с другом, поэтому при достижении критической точки смеси система всегда будет однофазной.

В сверхкритическом состоянии, как указано выше, вещество расширяется, занимая весь предоставленный объем подобно газу, но имеет высокую плотность, как у жидкости.

Именно уникальные свойства CO_2 в сверхкритическом состоянии делают возможными его применения в различных индустриях: нефтехимической, пищевой, парфюмерной, фармацевтической и других отраслях промышленности. Так, сверхкритический CO_2 (СК CO_2) обладает характеристикой более быстрого массового передвижения по сравнению с традиционными жидкими органическими растворителями, благодаря низкой вязкости и высокому коэффициенту диффузии (в 10 раз выше, чем у жидкости) при плотности, незначительно отличающейся от жидкости. *Таким образом, сверхкритический CO_2 может принципиально лучше, чем классический растворитель проникать в экстрагируемый материал, поглощать и транспортировать растворимые составляющие.* Это свойство сверхкритических газов широко применяется при экстракции различных органических соединений. Кроме того, растворяющая способность флюида в близкритической области претерпевает значительные изменения при малых изменениях температуры и давления. Это, в свою очередь, позволяет проводить

фракционирование исходного сырья и регенерацию растворителя без дополнительных энергетических затрат. Простое изменение параметров давления и температуры позволяет регулировать концентрацию веществ в экстракте. Все это обеспечивает наиболее полную экстракцию веществ, при этом применение углекислого газа позволяет полностью и в щадящем режиме отделять его от экстракта и материала - носителя в противовес классическим растворителям [15-21]. Применение углекислого газа позволяет полностью и в щадящем режиме отделять его от экстракта и материала - носителя в противовес классическим растворителям, выведение которых не всегда оказывается полным. Иными словами, экстракты, полученные при помощи данной методики, абсолютно свободны от растворителя. Потребление энергии для регенерации растворителя во многих случаях меньше, чем при традиционной экстракции. А избыточное давление в системе предотвращает проникновение кислорода во время экстракции, что приводит к исключению процессов окисления.

Вывод. Применение углекислого газа позволяет полностью и в щадящем режиме отделять его от экстракта и материала - носителя в противовес классическим растворителям, выведение которых не всегда оказывается полным. Иными словами, ингредиенты, полученные при помощи данной методики, абсолютно свободны от растворителя. Потребление энергии для регенерации растворителя во многих случаях меньше, чем при традиционной экстракции. А избыточное давление в системе предотвращает проникновение кислорода во время экстракции, что приводит к исключению процессов окисления. По результатам проведенных работ разработана и изготовлена лабораторная установка для проведения исследований процесса CO_2 -экстракции, рассчитанные на местное сырьё. Лабораторная установка для исследования получения ингредиентов из растительного сырья с применением СК- CO_2 состоит из ёмкости, теплообменника, экстрактора высокого давления, сепаратора, компрессора, конденсатора, баллона с газом CO_2 и змеевикового подогревателя экстракта. Изучены химико-физические характеристики объектов исследования (местное маслосодержащее сырьё) и целевых продуктов (масел, липидных комплексов). Определены методы анализа качества получаемых масел.

(Список литературы смотреть на стр. 143)