

8.2 Synthese eines adaptiven mechatronischen systems zum pneumatischen transport von schüttgutprodukten

Gegenwärtig sind pneumoelektrische Systeme (PES) in verschiedenen Bereichen der wissenschaftlichen und technischen Tätigkeit des Menschen weit verbreitet. Solche Systeme werden verwendet, um Aufgaben im Zusammenhang mit der Bewegung, Verteilung und Speicherung von Flüssigkeiten und Gasen zu erfüllen. Dies sind hauptsächlich Regelsysteme für mechanische Komponenten verschiedener Maschinen und Aggregate oder Regelsysteme für Parameter (Druck, Durchfluss) gasförmiger und flüssiger Medien. Designvielfalt, einfache und klare Bedienlogik und Zuverlässigkeit haben den Anwendungsbereich von PES für Produktionsprozesse unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen technischer Regelwerke erweitert. Die Fähigkeit, erhebliche Kraft und Geschwindigkeit zu übertragen, gewährleistet den Einsatz von PES im Bereich der Schwertechnik, die die Umwandlung erheblicher Gasenergie in mechanische Energie beweglicher Teile erfordert. Die Erfüllung der Aufgaben, für die PES bestimmt ist, wird durch Elemente von Rohrleitungsarmaturen erreicht, nämlich technische Geräte, die an Rohrleitungen, Ausrüstungen und Tanks installiert sind. Elemente von Rohrleitungsarmaturen dienen dazu, den Durchfluss des Arbeitsmediums durch Veränderung des Querschnitts zu steuern [360, S.37]. Die Zuverlässigkeit von PES hängt in den meisten Fällen von der Zuverlässigkeit richtig ausgewählter Elemente der Rohrleitungsarmaturen ab. Nach den aktuellen Normen [361, S.144] können folgende Haupttypen von Rohrleitungsarmaturen unterschieden werden:

- Absperrventile: Ventile, die dafür ausgelegt sind, den Fluss des Arbeitsmediums mit einer bestimmten Dichtheit zu blockieren;
- Rückschlagventile: Ventile zur automatischen Verhinderung Rückfluss der Arbeitsumgebung;
- Sicherheitsventile: Ventile zum automatischen Schutz von Anlagen und Rohrleitungen vor unzulässigem Überdruck durch Ablassen von überschüssigem Arbeitsmedium;

- Verteiler- und Mischventile: Ventile, die dazu bestimmt sind, den Strom des Arbeitsmediums in bestimmte Richtungen zu verteilen oder Ströme zu mischen;
- Regelventile: Ventile, die dazu bestimmt sind, die Parameter der Arbeitsumgebung durch Änderung der Durchflussrate oder des Querschnitts zu regulieren;
- Verteilerventile: Ventile zur Trennung von Arbeitsmedien in unterschiedlichen Phasenzuständen oder mit unterschiedlicher Dichte;
- Absperrventile: Ventile, die dazu bestimmt sind, den Fluss des Arbeitsmediums zu blockieren. Bedingung für Überlappung kann sein: Überschreiten des vorgegebenen Wertes der Strömungsgeschwindigkeit; Änderungen des Druckabfalls am empfindlichen Steuerelement; Änderungen des eingestellten Druckwertes in der Rohrleitung.

Eine häufig in PES eingesetzte Art von Regelventil ist ein Druckregler, der den Druck des Arbeitsmediums im Regelobjekt in einem vorgegebenen Wertebereich hält. Druckregler werden in Systemen für verschiedene Zwecke eingesetzt: von häuslichen Gasverteilungssystemen bis hin zu Raketentriebwerken und Luftversorgungssystemen, um den Lebensunterhalt von Astronauten zu sichern. Das Steuerelement in den meisten Druckreglern ist ein Ventil. Das Ventil ist mit einem Arbeitselement in Form einer Platte (im Folgenden Plattenventil) ausgestattet, das mit dem Aktuator oder Sensorelement verbunden ist. [362, S.247]. Die Ventilplatte ist ein bewegliches Element der Struktur, das beim Zusammenwirken mit dem Sitz einen Drosselabschnitt bildet, dessen Gasdurchfluss den Druck auf das Regelobjekt bestimmt. Um die Leistung zu verbessern, verwendet der Druckregler Feder- und Antriebssysteme. Der Druckregler bildet zusammen mit dem Regelobjekt ein geschlossenes Regelsystem. [363, S.17]. Bei der Beeinflussung des Systems durch Faktoren wie beispielsweise Änderungen der Verbraucherausgaben ändert sich der Ausgangsparameter (Druck des Arbeitsumfelds). Dementsprechend tritt das System in einen neuen Zustand ein, der für den normalen Betrieb stabil sein muss. Der im Druckregelsystem vorhandene Einschwingvorgang kann glatt oder von Schwingungen begleitet sein. Schwankungen

führen zu erhöhten Vibrationen und Geräuschen, die zu Brüchen und sogar zur Zerstörung von Geräten führen können. [364, S.120]

Um solchen Phänomenen vorzubeugen, wird bei der Entwicklung neuer Aktuatoren der Druckregler immer schon bei der Simulation von Arbeitsabläufen in Druckreglern vorgeprüft. Am schwierigsten ist es, die im Betrieb auf die Ventilplatte wirkenden Gaskräfte zu ermitteln. Zur Untersuchung dieser Phänomene wird in der Fachliteratur das Konzept des Auftriebskoeffizienten [365, S.25] oder in anderen Quellen der Strömungsdruckkoeffizient [366, S.34] verwendet. Der Beiwert berücksichtigt die Differenz zwischen der tatsächlichen Druckkraft des Mediums auf den Ventilteller, in Steigrichtung, und der statischen Druckkraft auf der Fläche des Tellers, die durch den Durchmesser des Ventilsitzes begrenzt ist. Die Druckverteilung auf der Ventilplatte ist aufgrund der dynamischen Kraft der Strömungsreaktion ungleichmäßig.

Heute gibt es eine experimentell ermittelte Basis von Auftriebszahlen, die sich auf typische Konstruktionen von Druckreglern beschränkt. Leider umfasst dies nicht die gesamte Palette möglicher Lösungen und schränkt die Möglichkeiten ein, diese Datenbank bei der Entwicklung neuer Geräte zu verwenden. [367, S.40].

Als Ergebnis der topologischen Analyse pneumatischer Transportsysteme werden die charakteristischsten technologischen Schemata und Regulierungsgesetze der Steuereinflüsse auf den Luftstrom getrennt.

Nach einer sorgfältigen Analyse der bestehenden Konstruktionslösungen von Versorgungssystemen für Gas- oder Flüssigkeitsgemische wurde festgestellt, dass der größte Vorteil in Konfigurationen mit elektropneumatischem automatischen Steuersystem vorhanden ist. Dies beinhaltet den Anschluss an das Objekt des Steuergeräts (Druckregler) und den Eingang zum Rückkopplungssystem. Somit hat das verallgemeinerte Blockdiagramm die Form von Fig. 1.

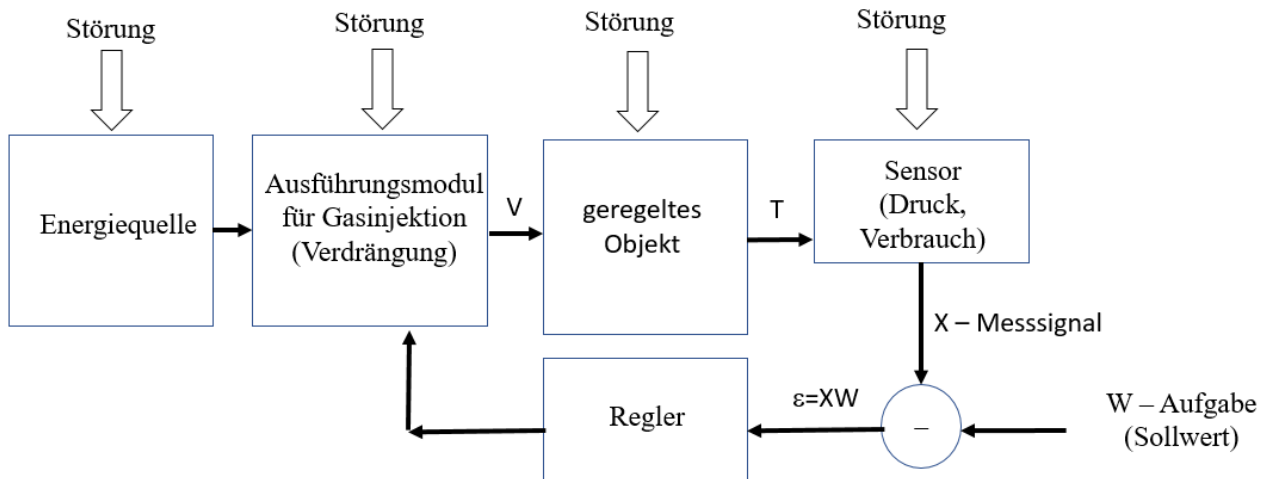
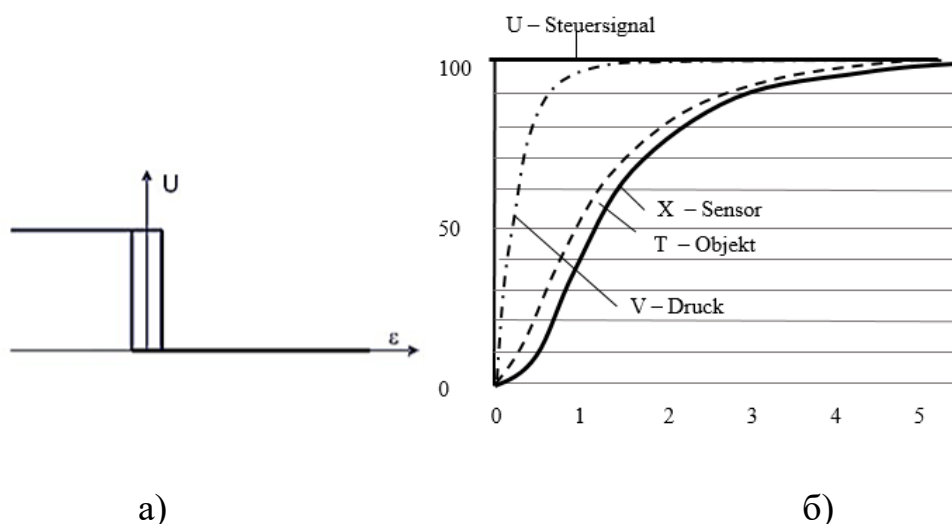


Abbildung 1. Blockdiagramm des Systems zur automatischen Regulierung des Luftstroms in der pneumatischen Produktleitung

Der Eingang des Reglers erhält ein Mismatch-Signal ε - die Differenz zwischen dem gemessenen Signal X und dem vorgegebenen Füllstand W (Sollwert). Die Aufgabe des Reglers besteht darin, das Stellglied so anzusteuern, dass das Fehlanpassungssignal bei Vorhandensein von Störungen auf Null reduziert wird. Wir glauben, dass der Regler durch den Aktuator und den Sensor vom Regelungsobjekt getrennt ist. Obwohl sie Teil des Steuerungssystems sind, „kennt“ die Steuerung die direkt mit dem Objekt verbundenen Signale V und T nicht. Die Aufgabe des Controllers ist es, nicht nur ein Objekt zu steuern, sondern ein ganzes System aus drei Elementen: Aktor, Objekt, Sensor. Dies erschwert die Verwaltung und mindert deren Qualität. Bei pneumatischen Ausstoßsystemen, deren Betrieb in direktem Zusammenhang mit dem Druckluftverbrauch und der arbeitstechnischen Umgebung steht, steht das Präzisionssteuerungssystem in direktem Zusammenhang mit der Leistung eines einzelnen FMM und der gesamten Verpackungsmaschine. Regler sind durch die Abhängigkeit des Steuersignals $U(t)$ von der Fehlanpassung $\varepsilon(t)$ gekennzeichnet:

$$U(t) = F\{\varepsilon(t)\}. \quad (1)$$

Im allgemeinen Fall ist die Funktion $F\{\varepsilon(t)\}$ ein nichtlineares Integro-Differential, dh ziemlich komplex. Die Zielfunktion des Reglers besteht darin, die Fehlanpassung ε bei Vorhandensein von Störfaktoren auf Null zu reduzieren. Verwendet das Regelsystem einen Stellungsregler, erfolgt die Regelfunktion gestuft, Abb. 2.



Figur 2. Allgemeine Art der Steuerwirkung auf das Steuerobjekt (Luftversorgungssystem zur Rohrleitung): a) Sprungfunktion; b) ein Beispiel für die Steuerwirkung des Reglers auf den technologischen Parameter

Betrachten Sie das Problem der Anpassung des elektropneumatischen Druckreglers in das Steuersystem der pneumatischen Förderproduktlinie für Schüttgüter. In [368, S.115] wird der Einsatz einer automatischen Anpassung des pneumatischen Aktuators an Laständerungen durch Beibehaltung der Geschwindigkeit betrachtet. Die Anpassung erfolgt durch einen Druckimpuls im Arbeitsraum der Produktleitung. In dieser Arbeit [369, S.22] wurde ein adaptives mechatronisches Modul basierend auf Druckreglern und dem ursprünglichen Treiber des Steuersignals für Druckluft entwickelt. Camozzi, Festo, SMC, Pneumax, Air Torque bieten in der Regel mechatronische Systeme mit internen Steuergeräten, die Druckluftströme steuern. Auf der Grundlage der Analyse von Methoden und Mitteln zur Steuerung von technologischen Geräten mit pneumatischen Aktuatoren sowie Methoden zur Regulierung der Geschwindigkeit und Zeit des Impulsflusses im pneumatischen Transport wird eine verallgemeinerte Struktur des Abschnitts des pneumatischen Transports vorgeschlagen (Abb. 2).

Die durchgeführten experimentellen und theoretischen Studien basieren auf der Anwendung der Grundgesetze der theoretischen Mechanik, der Hydrodynamik mehrphasiger Medien, der Theorie der Lösungen gewöhnlicher Differentialgleichungen, Gleichungen in partiellen Ableitungen, numerischer

Methoden; Mechanik des deformierten Körpers; die Arbeiten des Autors über die experimentelle Erforschung der Pneumotransportprozesse. [370, S.462]

Das Funktionsprinzip des Versuchsaufbaus ist wie folgt. Der arbeitende vertikale Kanal der Produktleitung geht in den Bereich des Schneckentrichters des Beschickers über, der das feinkörnige Produkt in den Bereich der Druckluftzufuhr leitet. Im vertikalen Rohr wird die Bewegung des Produkts durch zwei Zonen dargestellt: den Beschleunigungsbereich; der Bereich der Stabilisierung der Bewegung des Produkts, in dem Geschwindigkeit und Konzentration im Fluss konstant sind. Der Druckluftverbrauch hängt vom Wert des Eingangshauptdrucks P (0,1 ... 0,3 MPa) ab und beträgt gemäß [12, S.18] 80-160 Nl / min.

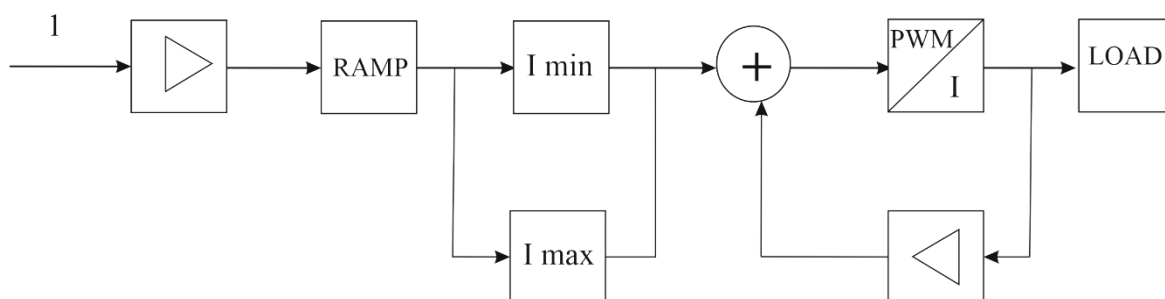


Abbildung 2. Schema der Signalübertragung für die gepulste Druckluftversorgung in einer vertikalen Rohrleitung: 1 - Standardsignal; RAMP - Kalibrierung der Übertaktungszeit; I min, I max - Strombelastung (mA); PWM - Leistungssteuerung durch pulsierendes Ein- und Ausschalten des Geräts; I - Stromkalibrierung (mA), Maximalwert des dem Ventil zugeführten Stroms mit einem Referenzsignal von 100% einstellen.; LAST - Last im Steuerkreis. In dem Steuersystem von Fig. 2 werden Camozzi-Elemente verwendet: Treiber der Serie 130 zur Steuerung von Proportionalventilen des Ventiltyps AP (2/2), elektronischer Sensor/Druckschalter, Serie SWCN, Booster 40M2L100A120MC02.

Betrachten Sie den Prozess des pneumatischen Transports von kleinstückigen Produkten im Versuchsstandsystem. Der Prozess der Partikelrotation im Gasstrom ist mit dem Fehlen einer Kugelform, dem Vorhandensein einer Stoßwechselwirkung zwischen den Partikeln und der Wand der Produktleitung sowie dem Effekt des Verdrehens von Partikeln durch einzelne kleine turbulente Wirbel verbunden. Die Beschreibung der Kontroll- und Messausrüstung ist in Abb. 3 dargestellt. Розглянемо

процес при пневмотранспортуванні дрібно-штучного продукту в системі експериментального стенду.

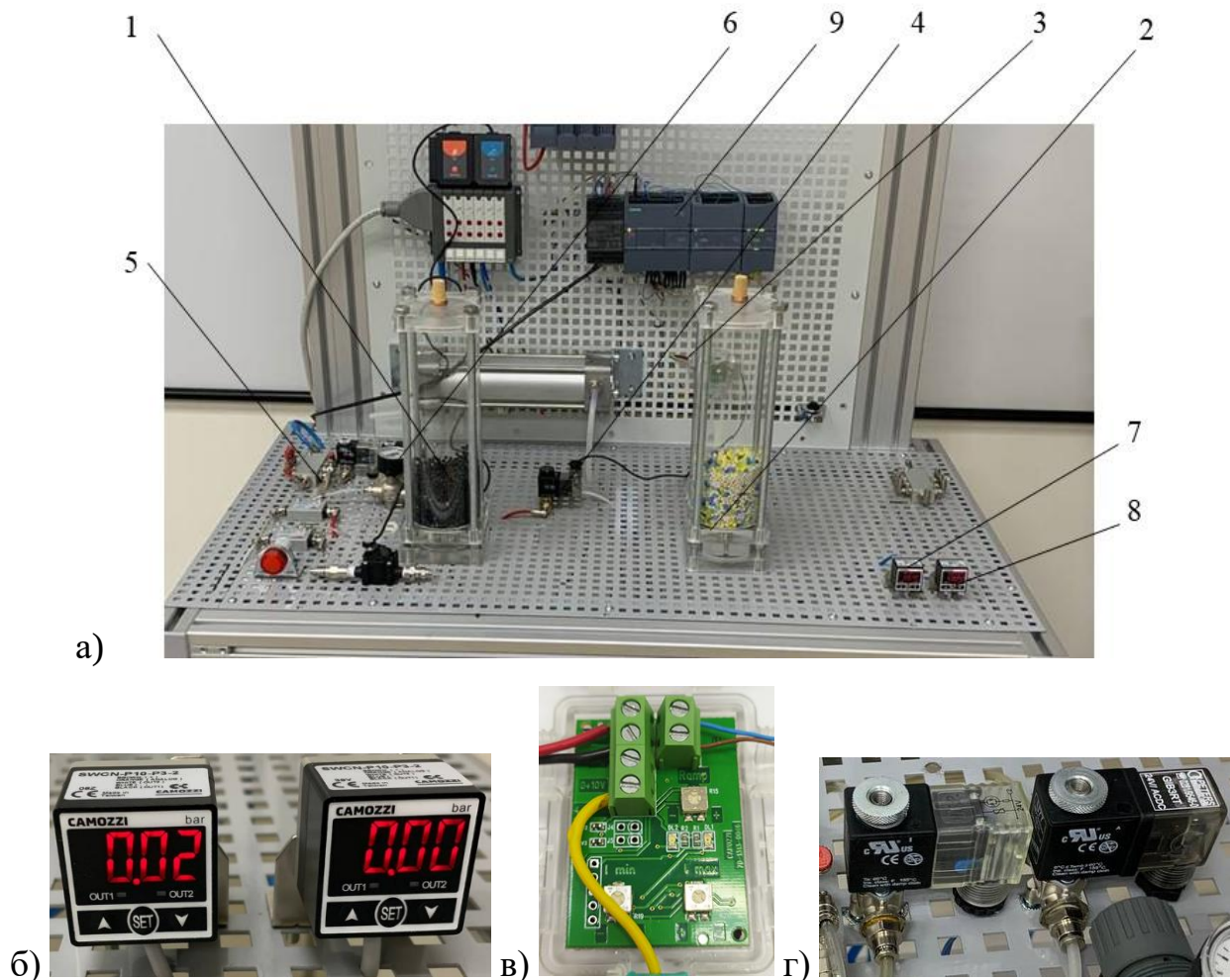


Abbildung 3. Art des Versuchszustandes zur Untersuchung des pneumatischen Transports von Massen- und Kleinstückprodukten: 1,2 - vertikale Kanäle; 3,5 - Treiber der Steuerung der proportionalen Zufuhr des Impulses der Druckluft (in); 4,6 - proportionale elektromagnetische Verteiler mit direkter Wirkung 2/2 (g); 7,8 - elektronische Vakuum- / Druckrelais mit Analogausgang (b); 9 - Programmiergerät zur Einstellung des Signaländerungsgesetzes 4... 20mA

Während der experimentellen Forschung entstand die Aufgabe, die physikalischen Parameter des Prozesses zu messen und deren weitere Verwendung zur Änderung der Eingangsparameter des Systems. Insbesondere SWCN-Druckrelais (Abb. 3, b) wurden verwendet, um die Druckänderung zu messen, deren Daten an das Steuergerät (in diesem Fall die SPS) übertragen werden können und die Grundlage für die Einstellung neuer Betriebsparameter des Systems bilden.

Die Möglichkeit, variable Modi der Druckluftversorgung sowie die Echtzeitanpassung im Versuchsstand einzustellen, wird durch die in Abb. 3 (c) gezeigten Geräte implementiert. PWM-Signalgeber zur direkten Ansteuerung von Proportionalventilen über typische Analogsignale. Mit der elektronischen Proportionalventilsteuerung der Serie 130 können Sie jedes Magnetventil mit einem maximalen Strom von bis zu 1 A steuern. Um die Wiedergabe der oben beschriebenen Steuersignale zu ermöglichen, ist ein spezielles elektropneumatisches Ventil AR, gezeigt in Fig.3 (d), vorhanden. In den AP-Ventilen für die Umsetzung der Proportionalsteuerung wurden die Reibungseigenschaften optimiert und der Effekt des „Klebens“ des beweglichen Elements reduziert. Als Steuersignal wird das pulswidenmodulierte Spannungs- oder Stromsignal verwendet.

Im System des Versuchsstandes wird das PWM-Prinzip genutzt, um eine gepulste Druckluftzufuhr in die pneumatische Produktleitung des Transportsystems für lose Lebensmittelprodukte zu formen.

Pulsweitenmodulation (PWM) Annäherung des gewünschten Signals (mehrstufig oder kontinuierlich) an die tatsächlichen binären Signale (mit zwei Pegeln - ein / aus), so dass ihre Werte im Durchschnitt für einen bestimmten Zeitraum gleich sind. Das Prinzip der Pulsweitenmodellierung (PWM) ist seit langem bekannt, wird jedoch erst seit relativ kurzer Zeit in verschiedenen Schemata verwendet. Es ist ein wichtiger Punkt in der Arbeit vieler Geräte, die in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden.

Der entwickelte Versuchsstand am Ort der Druckluftimpulsbildung ist mit mehreren Regelschemata ausgestattet, die in Abb.4 dargestellt sind.

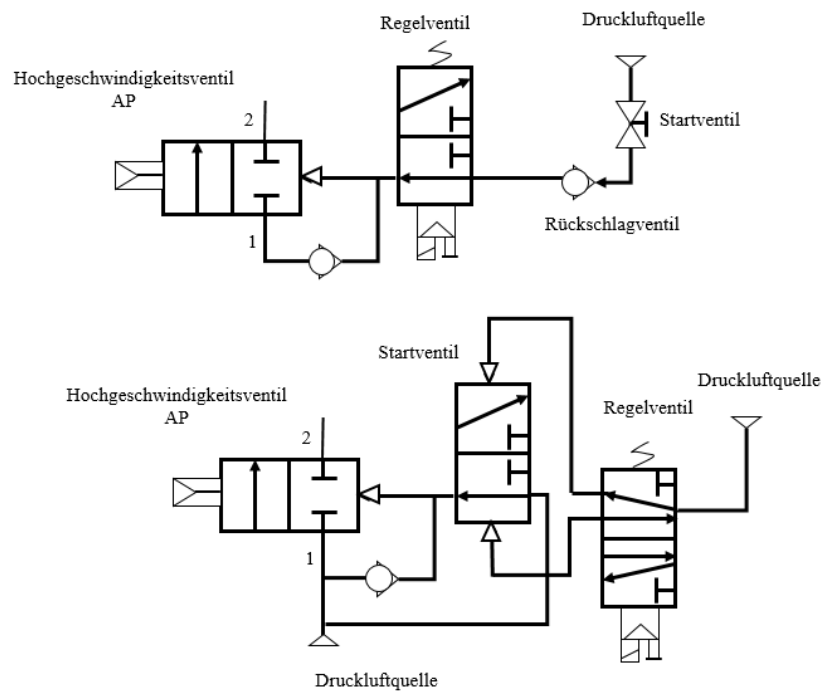


Abb.4. Schematische pneumatische Diagramme des Steuerbereichs des AR-Ventils

Das Prinzip von PWM, wie dieser Name schon sagt, besteht darin, die Impulsbreite des Signals zu ändern. Bei Verwendung des Verfahrens der Pulsweitenmodulation bleiben Signalfrequenz und -amplitude konstant. Das nützliche PWM-Signal kann durch Vergleichen des kontinuierlichen Steuersignals V_c und des Hochfrequenz-Trägerwellensignals V_d wie gezeigt (Fig. 5) implementiert werden. Normalerweise trägt der Zahn Hochfrequenzwellen mit einer Periode T . Die Frequenz und Amplitude der Trägerwelle muss sich schneller ändern als bei einem kontinuierlichen Signal, dh. das PWM-Signal kann auf einfache Weise erhalten werden, indem das kontinuierliche Steuersignal V_c mit dem Trägersignal V_d verglichen wird, wie in der Figur gezeigt.

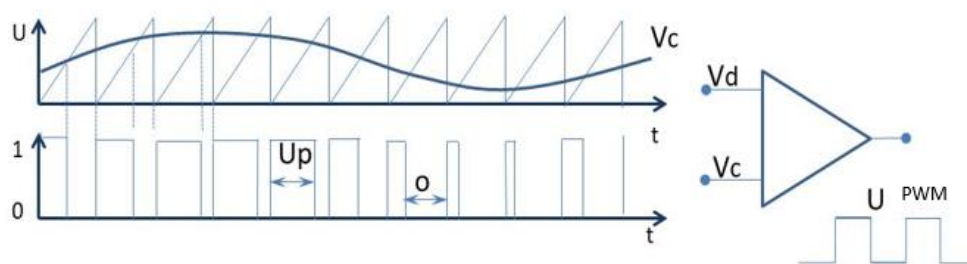


Abbildung 5. Das Prinzip der PWM-Signalerzeugung

Wenn die Zeit zum Ansteigen und Absenken von Impulsen klein ist, lautet die mathematische Beschreibung der PWM-Modulation wie folgt [370, S.56]:

$$U_{PWM}(t) = \begin{cases} U_p, & \text{wenn } V_c(t) \geq V_d(t); \\ 0, & \text{wenn } V_c(t) < V_d(t), \end{cases}$$

wo U_{PWM} - Eingangsspannung (Signal);

$$U_{PWM}(t) = \begin{cases} U_p, & \text{Schalter offen,} \\ 0, & \text{Schalter geschlossen.} \end{cases}$$

Wir gehen davon aus, dass das Magnetventil ein ideales Relais ist und entsprechend eingeschaltet ist, wenn das PWM-Signal signifikant ist.

Dementsprechend bestimmt die Summe der Zeit des High- und Low-Signals die Periode [371, S.67]. Wichtige Parameter des PWM-Signals sind:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{II}}; \quad T_{II} = T_{on} + T_{off},$$

D ist das Bohrloch; T_{II} - Signalperiode; T_{on} - Hochpegelzeit (Ventil geöffnet); - Niedrigniveauzeit (Ventil geschlossen). Wir berücksichtigen auch das Konzept des Füllfaktors, der umgekehrt proportional zum Wahnsinn ist.

Unter Verwendung des synthetisierten Treibers auf der Plattform 130-222 und des Ventils AP -2/2 NC in Abb. 6 wird eine allgemeine Ansicht des mechatronischen Adaptersystems und des Integrationsschemas in das Steuersystem des Versuchsstands gezeigt.

Betrachten Sie den Prozess des pneumatischen Transports, gesteuert durch Druckluftimpulse, die die Betriebsmodi bestimmen. Der Luftstrom wird am Eingang des Kanals mit dem Produkt mittels eines pneumatischen Ventils gebildet, das durch die Stromerzeugung durch die Heaviside-Funktion (Einzelschrittfunktion) gesteuert wird. Der Strommesswert in mA (ab 0,001 mA) bezogen auf die Normskala I_{max} , $I_{min} = 4..20$ mA, aufgezeichnet in den Bereichen 4,1 mA ... 19,9 mA; 12 mA ... 19,9 mA. Verbrauchskennlinie des pneumatischen Ventils in der Installation = 180 Nl / min Die Dauer der Funktionsperiode wird mit 0,3 s angenommen.

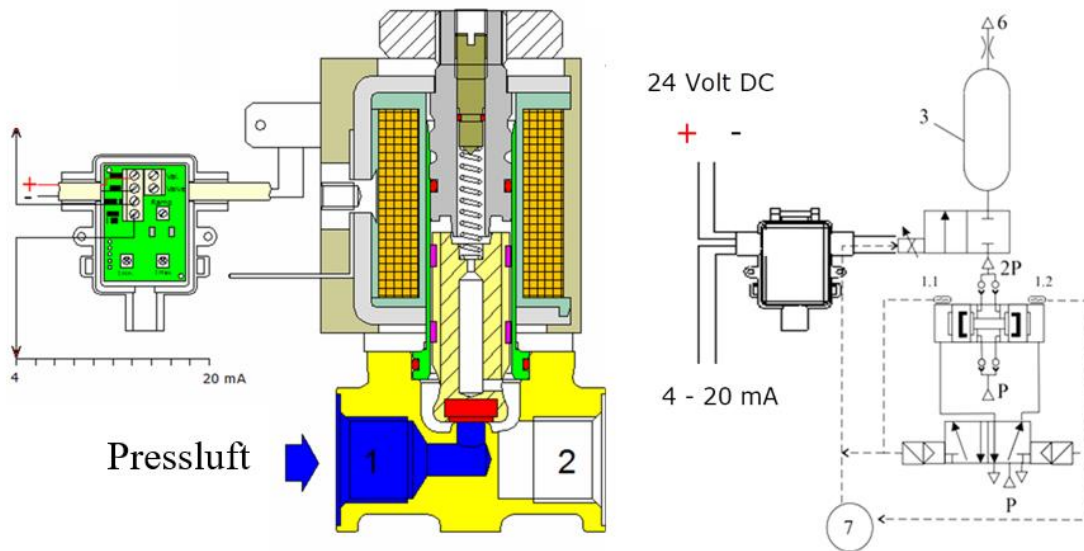


Abbildung 6. Allgemeines System der PWM-Modulation im Steuermodul des Versuchsstands: a) Abschnitt des AR-Ventils mit dem Treibersystem; b) das Anschlussschema des Fahrers im allgemeinen Steuerschema

Bei der Formulierung des Problems der mathematischen Modellierung betrachten wir die Bewegung eines kugelförmigen Teilchens mit Radius r' , Dichte ρ' in einer turbulenten Gasströmung. Bedingungen: stationäre Strömung, inkompressibles Gas, kinematische Viskosität $\nu = \mu/\rho$. μ - ist die dynamische Viskosität des Gases (Druckluft), ρ ist die Dichte der Luft. Da Druckluft turbulent ist, unterliegt der Widerstand des Partikels gegenüber dem Gas dem nichtlinearen Gesetz. Daher wirkt die Schwerkraft auf das Teilchen; $G = \rho' \cdot g'$, (H); g' – Vektor der Erdbeschleunigung. Die Eingabeparameter des mathematischen Modells werden unter Berücksichtigung folgender Werte beschrieben: Teilchenradius $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (m); Dichte des einzelnen Partikels des Schüttguts $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (kg·m⁻³); $\rho' = 1,24 \cdot 10^3$ (kg·m⁻³); Beschleunigung des freien Falls $g = 9,81$ (m·s⁻²); maximaler Druckluftvolumenstrom $v_m = 20$ (m·s⁻¹); dynamische Viskosität $\rho' = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (kg·m³); Rohrradius $b = 0,05$ m. Im Druckluftstrom erhält das Partikel eine Rotationsbewegung, die die Bewegungsgleichung bestimmt (Abb.2.5):

$$\frac{\pi}{6} (2 \cdot r')^3 \rho' \frac{du_i}{dt} = D'(v_i - u_i) + G_i + F_s,$$

$i = x, y, z$; v_i – Projektion des Geschwindigkeitsvektors der Druckluft; u_i – Projektion des Teilchengeschwindigkeitsvektors $\bar{u}$ in Bezug auf das feste Bezugssystem x, y, z ; F_i – Projektionen des Rubinov-Keller-Kraftvektors auf die sphärische Oberfläche des Partikels von der Seite der Druckluft während der Rotation; G_i – Projektion des Gravitationsvektors auf das Teilchen; wo

$$D' = 6\pi\mu r' \left(1 + 0,065 \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \left(\sqrt{\bar{u} - \bar{v}} \right) \right) \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

Die Rotationsbewegungsgleichung von Teilchen zusammen mit der Bewegungsgleichung

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_x}{dt} = D'(v_x - u_x) + G_x + F_x, \\ \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_y}{dt} = D'(v_y - u_y) + G_y + F_y, \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu(2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \end{cases} \quad (3)$$

wo $\omega = \omega_z$ – Projektion des Vektors aus der Winkelgeschwindigkeit während der Drehung des Teilchens auf die z-Achse; J-Trägheitsmoment des Teilchens relativ zur Mittelachse, die parallel zur Achse O_z verläuft: $J = \frac{\pi \cdot (2 \cdot r')^5 \rho'}{60}$.

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu(2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \quad (4)$$

Berechnungsschema der kinematischen Eigenschaften des Partikels für den etablierten Transportmodus (Abb. 7).

Im Moment der Kollision von Partikeln mit einer Wand einer Produktleitung müssen Geschwindigkeiten nach dem Abprall von einer Oberfläche unter Berücksichtigung möglicher Flugbahnen berechnet werden. Um die kinematischen Parameter des Verhaltens von Partikeln nach dem Aufprallkontakt mit der Wand der Produktleitung zu berechnen, nehmen Sie den Radius des kugelförmigen Partikels $r = d / 2$, alle Parameter nach dem Aufprall sind mit * gekennzeichnet.

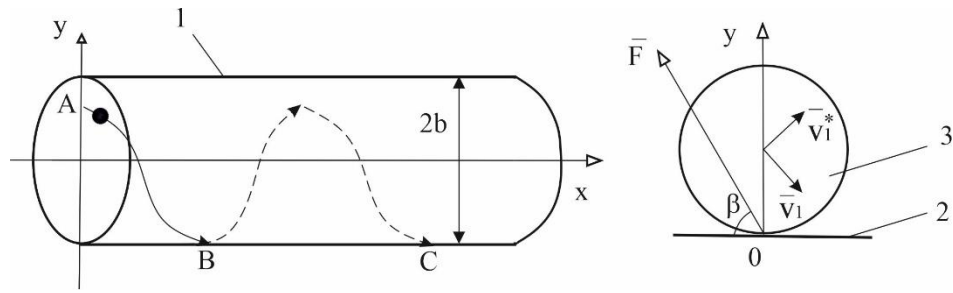


Abbildung 7. Die Flugbahn des Partikels mit gemeinsamen kinematischen Eigenschaften: 1 - Produktleitung, 2 - Innenwand der Produktleitung, 3 - Anteil des feinkörnigen Produkts

Eigenschaften des Partikels beim Aufprall (M ist eine Funktion der Position des Objekts):

$$\begin{aligned}
 M(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1) &= -|F|\cos\beta, \\
 M(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) &= |F|\sin\beta, \\
 M(x_1(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) - y_1(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1)) + J_1(\omega_z^* - \omega_z) &= 0,
 \end{aligned} \tag{5}$$

Das erhaltene mathematische Modell des beschriebenen Modus während des Pneumotransports wird gelöst, indem die Bewegungsgleichungen auf die kanonische Form reduziert werden. Numerische Berechnungsmethoden nach der Runge-Kutt-Theorie mit einem Unterprogramm nach dem Schema der vierten Genauigkeitsordnung ermöglichen es, erste Ergebnisse für Experimente zur Untersuchung kritischer Arten des pneumatischen Transports von Schüttgütern zu erhalten. Nach Transformationen werden die Werte der Winkel - ω_z^* und $\dot{x}_1^*$ Lineargeschwindigkeit der Partikelbewegung nach dem Aufprall erhalten:

$$\begin{aligned}\omega_z^* &= \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4}k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \cdot \omega_z - \frac{1}{2} \left(\frac{md(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right), \\ \dot{x}_1^* &= k_\tau \dot{x}_1 + k_\tau \frac{d}{2} \omega = - \left\{ \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4}k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \cdot \frac{d \cdot \omega_z^2}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{md^2(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right) \right\}.\end{aligned}\quad (6)$$

Der moderne Ansatz zur Schaffung von pneumatischen Transporteinheiten, die in nicht standardmäßigen Modi der Luftgemischbewegung arbeiten, basiert auf Untersuchungen von Phasenzuständen und Übergängen von Luftgemischen, Bedingungen ihrer Bildung und Erhaltung in verschiedenen Abschnitten der Transportleitung [371, p.197]. Die Verbesserung der technischen Leistungsfähigkeit der pneumatischen Förderung von Schüttgütern wird durch Intensivierung des Stoffaustausches durch Energiezufuhr mit zusätzlichen Luftdüsen, Verwirbelung der Strömung, Vibrationswirkungen auf das Schüttgut oder das Zusammenwirken mehrerer Faktoren erreicht [372, S.255]. Zur Verbesserung des Stoffaustausches tragen auch die in der Rohrleitung auftretenden Schwingungsvorgänge durch die strukturierte Bewegung des Luftgemisches und die Wellen der „Verdichtung – Verdünnung“ des Gasstoffstromes bei.

Aufgrund der theoretischen Untersuchungen des Prozesses der Zerstörung der Kellerbildung von losen Lebensmitteln in Futterbunkern wird die Aufgabe gestellt, ein mathematisches Modell der Arbeit des Pneumozzle-Vernichtungssystems (Luftkanonen) zu entwickeln. Zur Berechnung von Arbeitsprozessen in Kraftwerken haben sich in letzter Zeit CAE-Pakete (Computer-Aided Engineering) durchgesetzt. Es sollte beachtet werden, dass solche Pakete im Fall der Verwendung gasförmiger Komponenten eine akzeptable Genauigkeit für technische Berechnungen gewährleisten können.

Die Approbation des entwickelten 3D-Moduls wurde für das Softwarepaket ANSYS Fluent durchgeführt. Unter Verwendung des entwickelten Moduls wurde eine parametrische numerische Studie des Arbeitsprozesses in einer asymmetrischen Direktflusstruktur durchgeführt. Die durchgeführte Modellierung zielt darauf ab, Muster zu identifizieren, die den Einfluss des Verhältnisses der Komponenten, die Bedingungen der Zweiphasenmischung (Luft - Partikel) und deren Einfluss auf die Effizienz des Arbeitsprozesses beschreiben. Als Ergebnis des Vergleichs der Ergebnisse der Parameterstudie mit experimentellen Daten ist es möglich, ein spezifisches praktisches Problem zu lösen: die Werte der empirischen Konstanten im Bewegungsgesetz der Produktpartikel im Luftstrom zu wählen.

Zu Beginn der Studie wurde als Anfangsparameter angenommen, dass das Gerät nach dem Prinzip des pneumatischen Düsensystems arbeitet und einen direkten Kontakt für den Luftstrom mit dem Schüttgut herstellt. Arbeitsschritte zum Erstellen eines Modells sind in Abb. 8 dargestellt.

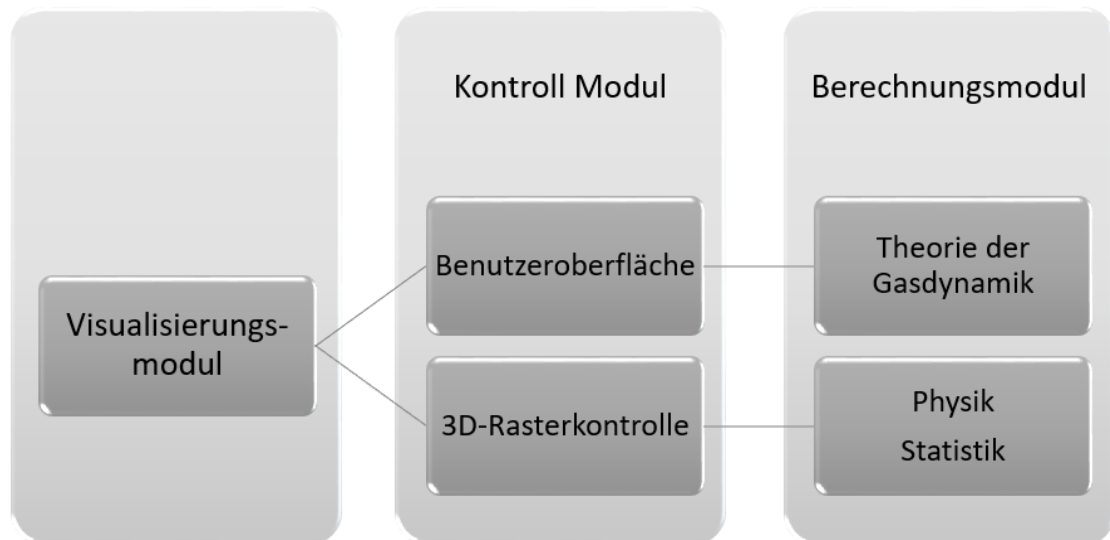


Abbildung 8. Schritt-für-Schritt-Erstellung eines Simulationsmodells einer pneumatischen Vorrichtung zur Vernichtung eines Schüttguts in einem Trichter

Die Analyse bestehender Softwarepakete zur Modellierung der Dynamik von Luftströmungen zeigte, dass sie auf Standardmethoden der numerischen Hydrodynamik basieren: Finite-Elemente-Methode für inkompressible Flüssigkeiten und Methoden zur Integration von Navier-Stokes-Gleichungen für viskose inkompressible Flüssigkeiten. Fig. 9 zeigt ein Diagramm des Einsatzes von

Softwaremodulen, die von einer spezialisierten Subroutine entwickelt wurden, die auf dem Softwarepaket "ANSYS" basiert, das für die Modellierung der Dynamik von Luftgeräten am besten geeignet ist.[373, S.1933]

Die experimentellen Studien bieten die Möglichkeit, empirische Muster des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Eigenschaften des Arbeitsablaufs zu erhalten. Die verfügbaren Daten erlauben jedoch keine detaillierte Analyse des Verhaltens von Druckluft an schwer zugänglichen Stellen der Konstruktion von pneumatischen Düsensystemen zur Zerstörung von Gewölben sowie zum Zeitpunkt der Wechselwirkung des Luftstroms mit dem Produkt im Inneren Transport in geschlossenen Pipelines.

CFD-Methode (Computational Fluid Dynamics, CFD) - eine Einheit der Mechanik kontinuierlicher Medien, die eine Reihe physikalischer, mathematischer und numerischer Methoden zur Berechnung der Eigenschaften von Strömungsprozessen umfasst.

In Abb.9. ein Computer-CFD-Modell des Luftgeschwindigkeitsgradientenfeldes ist gezeigt.

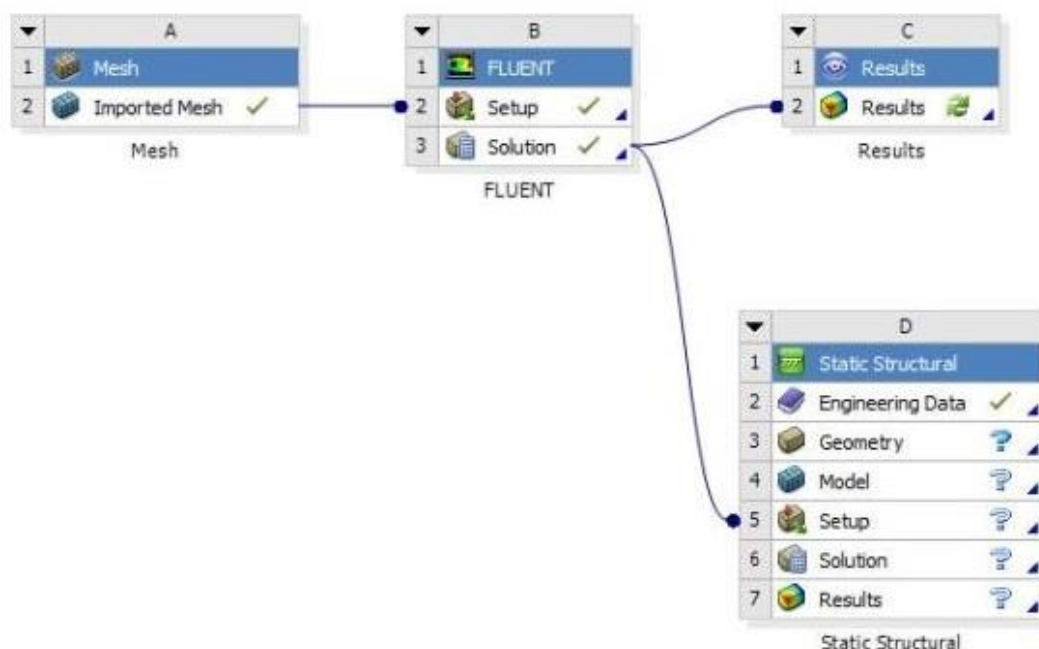


Abbildung.9. Bereitstellungsdiagramm von Softwaremodulen

Im Softwarepaket ist es möglich, den Partikeltyp für die Modellierung von Schüttgütern auszuwählen. Das Schema zur Anwendung des Berechnungsrasters wird auf der Grundlage der integrierten Funktionen ausgewählt, Abb.10., Abb.11.

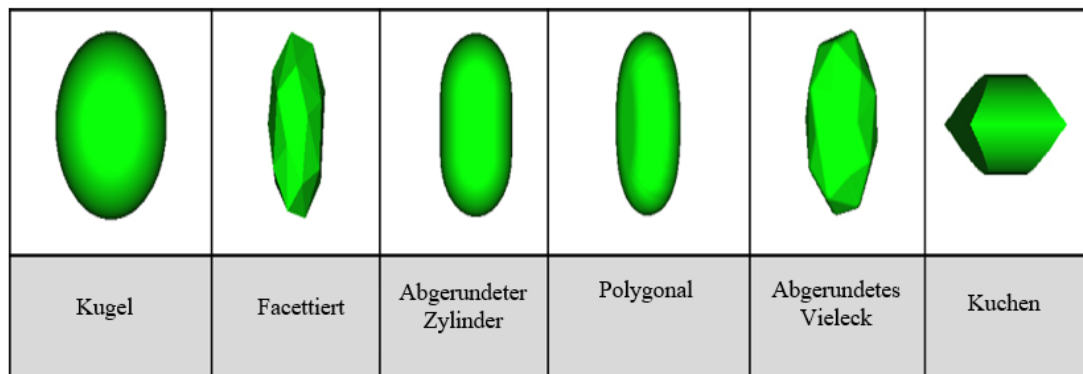


Abbildung 10. Teilchen in der Geometrie

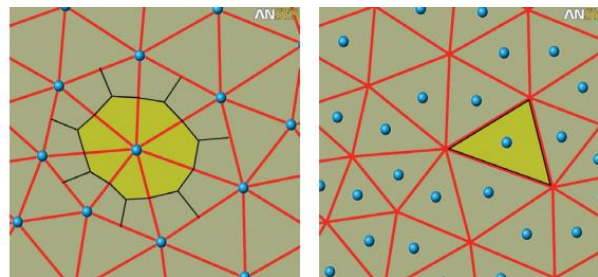


Abbildung 11. Kontrollvolumenschema, zentriert auf dem Knoten – CFX (links) und zentriert auf der Zelle – Fluent (rechts).

Durch den Einsatz von hochwertigen Sechseckgittern bei der Simulation der Strömung in den strömenden Teilen von Turbomaschinen kann die Genauigkeit und Effizienz von Berechnungen deutlich gesteigert werden. Sechseckiges Gitter ist in Bezug auf Rechenressourcen viel sparsamer als tetraedrisches Gitter. Und die Struktur der Gitterlinien ist normalerweise so, dass sie entlang der Stromlinien gerichtet sind, was den Fehler beim Abtasten der Gleichungen reduziert.[374, S.544]

Zur Lösung der Probleme wurde ein mathematisches Modell basierend auf der kombinierten Lagrange-Euler-Methode in hochenthalpieartiger Luftströmung verwendet. Die Option, wenn die Gasphase ein Gemisch aus Luft und Produkten ist, wird zur Erwägung ausgewählt. Die chemische Wechselwirkung wird durch einen irreversiblen Prozess akzeptiert und verläuft nach dem Schema "Luft → Produkte". Da die für die berechnete parametrische Studie ausgewählte Pipeline eine asymmetrische Konfiguration hat, wurde bei der Modellierung der Eigenschaften der Gasphase ein

System von Gleichungen für Kontinuität, Impulserhaltung und Energie verwendet, die in Zylinderkoordinaten geschrieben sind:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial(A-R)}{\partial x} + \frac{\partial(B-X)}{\partial r} + \frac{F}{r} = S;$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w \\ \rho v \\ e \\ \rho Y_{pr} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \rho w \\ p + \rho w^2 \\ \rho w v \\ (e+p)w \\ \rho Y_{pr} w \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho w v \\ p + \rho v^2 \\ (e+p)v \\ \rho Y_{pr} v \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ w\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_x \\ \rho D \frac{\partial Y_{pr}}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ w\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_r \\ \rho D \frac{\partial Y_{pr}}{\partial r} \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho w v - \tau_{xr} \\ \rho v^2 - \tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} \\ (e+p)v - w\tau_{xr} - q_r \\ \rho Y_{pr} v - \rho D \frac{\partial Y_{pr}}{\partial r} \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} S_p \\ S_w \\ S_v \\ S_e \\ S_{pr} \end{bmatrix}$$

Hier t ist Zeit; x, r - axiale und radiale Koordinaten; ρ - Dichte des Gases; w, v - axiale und radiale Komponenten der Gasgeschwindigkeit; $e = \frac{p}{k+1} + \frac{\rho(w^2+v^2)}{2}$ - Gesamtenergie pro Gasvolumeneinheit (wobei k der adiabatische Index ist); Y_{ps} - Massenanteil von Produkten; p ist der Gasdruck; $\tau_{xx}, \tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{xr} = \tau_{rx}$ viskose Spannungen für den Gasfluss; q_r, q_x - Luftströme in axialer und radialer Richtung; D der Diffusionskoeffizient ist; S_w, S_v, S_r, S_{ps} - Komponenten, die die Wirkung von Bewegung, Flug von Partikeln der dispergierten Phase auf den Gasstrom beschreiben. Es wird angenommen, dass die Massenkonzentration von Luft gleich $Y_B = 1 - Y_{ps}$ ist. Das System wird durch die Zustandsgleichung einer Mischung aus idealen Gasen und einem Einparametermodell der Turbulenz geschlossen.

Es ergeben sich Ergebnisse experimenteller Forschungen, die theoretische Forschungen bestätigen. Die erhaltenen Ergebnisse ermöglichen Vergleiche mit bestehenden Analoga des entworfenen Geräts.

Untersuchungsgegenstand war eine pneumatische Düsenvorrichtung mit Membranventil. Bei der Erstellung eines parametrischen Modells des Betriebsprozesses der Vorrichtung für mehrkomponentige Lebensmittel-Massenmischungen, Abb. 12, wird das ANSYS-Paket verwendet.

Das Design des konischen Trichters der Zuführung, gezeigt in Abb. 13. Der moderne Ansatz zur Schaffung von pneumatischen Transporteinheiten, die in nicht standardmäßigen Modi der Luftgemischbewegung arbeiten, basiert auf Untersuchungen der Phasenzustände und Übergänge des Luftgemischs, der Bedingungen ihrer Bildung und Erhaltung in verschiedenen Abschnitten der Transportleitung [372 , S.250].

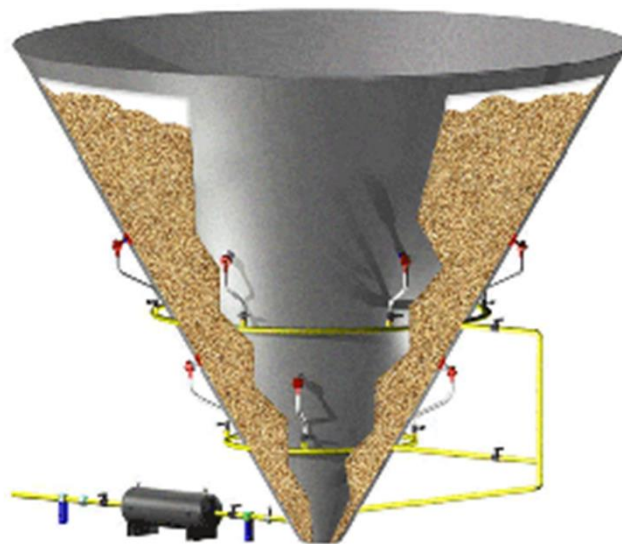
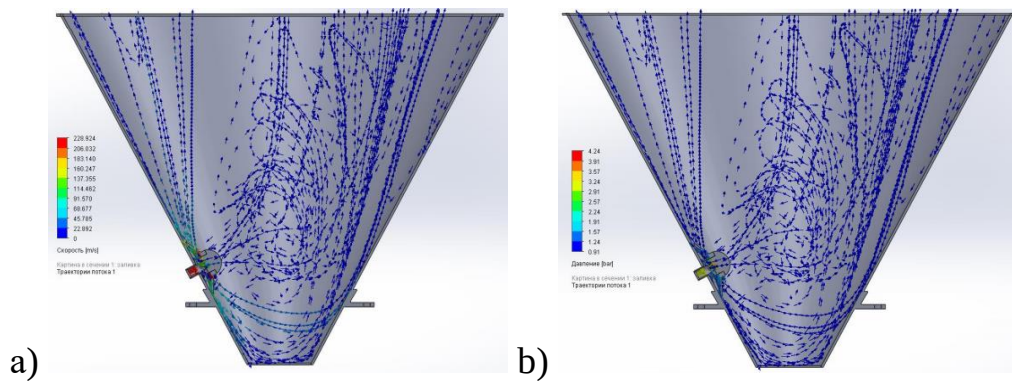


Abbildung.12. Verallgemeinertes 3D-Modell des Vernichtungsprozesses bei der Lieferung von losen Lebensmitteln



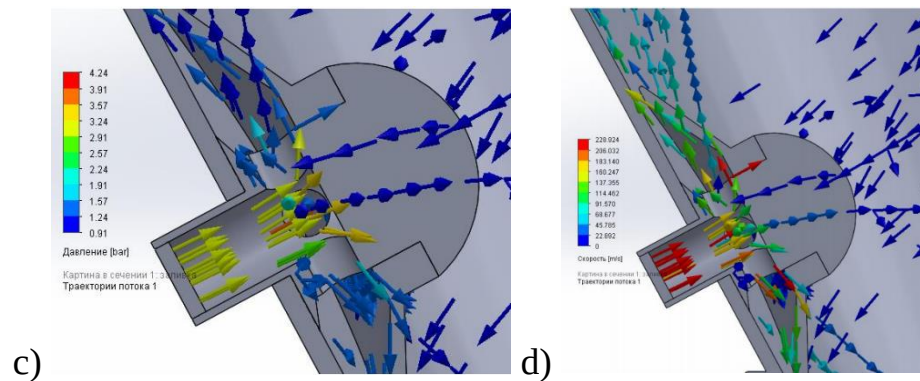


Abbildung 13. Ergebnisse von Studien zur Strömungsverteilung im Trichter: a) 3D-Schnitt des Trichters mit Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit; b) 3D-Schnitt des Trichters mit Druckanzeige; c) 3D-Schnitt des Düsensystems mit der Darstellung der Druckverteilung; d) 3D-Schnitt des Düsensystems mit der Spiegelung der Strömungsgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Untersuchung des elektropneumatischen Ventils in der Zusammensetzung des pneumatischen Düsensystems mit der Vorrichtung zur Zerstörung des Gewölbes (bei einer Kanallänge von 0,6m): Die Luftströmungsgeschwindigkeit am Auslass der Düse beträgt 260 m/s . Im Bereich von 2 bis 7 bar erfolgt eine stufenweise Druckänderung; - am Auslass des Ventils gibt es eine deutliche Turbulenz der Strömung und es gibt einen Übergang zum überkritischen Bewegungsmodus des gasförmigen Mediums, der einen ausreichend vollständigen Impuls für die Zerstörung liefert; - die Ergebnisse, die bei der Verarbeitung der Trendlinie in der Software Excel Polynomnäherung innerhalb von $R^2 = 0,95 \dots 0,96$ erhalten wurden, was die Angemessenheit des erstellten Modells anzeigt. Anhand der Ergebnisse von Studien des pneumatischen Düsensystems bauen wir ein Modell auf und untersuchen den Prozess der Leckage und Ausbreitung von Strömungen im Trichter. [375, S.453]

Abbildung 14 zeigt deutlich die Verteilung der linearen Geschwindigkeit des kleinen künstlichen Produkts, wenn es sich unter Druck im Kanal der Produktleitung bewegt.

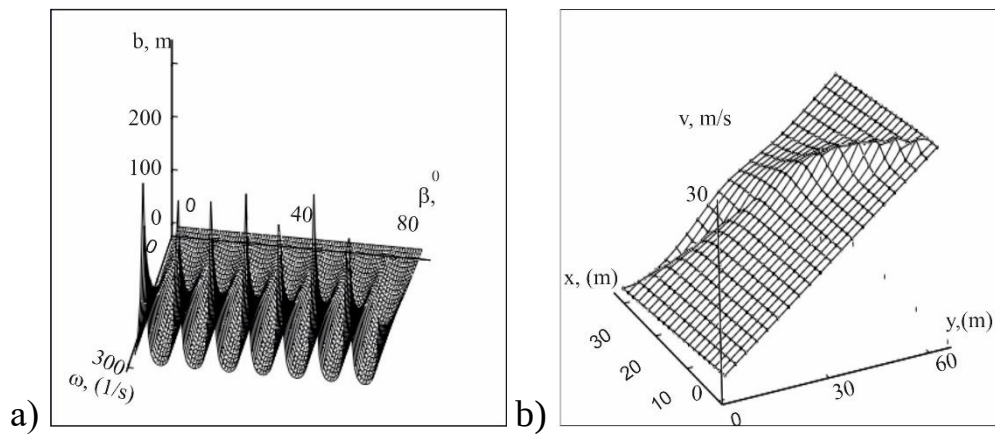


Abbildung 14. Kinematische Parameter des Transports von kleinteiligen Produkten in verschiedenen Bereichen des pneumatischen Transports: a - Änderung der Winkelgeschwindigkeit ω der Partikelbewegung nach Kontakt mit der Wand der Produktleitung; b - Änderung der linearen Geschwindigkeit des feinkörnigen Produkts v beim Bewegen im Kanal der Produktleitung unter Druck

Daten des Zustands des Gemischs aus Luftprodukt können aufgezeichnet und verwendet werden, um die Parameter des Ventils zu korrigieren.

Aus der Analyse der erhaltenen Ergebnisse können wir schließen, dass das ausgewählte Design die Verteilung des Luftstroms in den Bereichen der wahrscheinlichen Bildung von Krypten vorsieht, was deren Bildung verhindert oder die bereits gebildeten direkt zerstört. Die Ergebnisse bestätigen auch die Wirksamkeit von pneumatischen Düsensystemen zur Sicherstellung der Kontinuität beim Verpacken und Dosieren von losen Lebensmitteln.

Dies bestätigt die Ergebnisse der Modellierung [376, S.650] zum Einfluss lokaler Widerstände zur Erhöhung des spezifischen Druckverlustes. Zweck der physikalischen Modellierung ist die Bestimmung des Drucks im pneumatischen Transportkanal unter der Bedingung gepulster Druckluftzufuhr sowie die Abschätzung der Energiekosten.

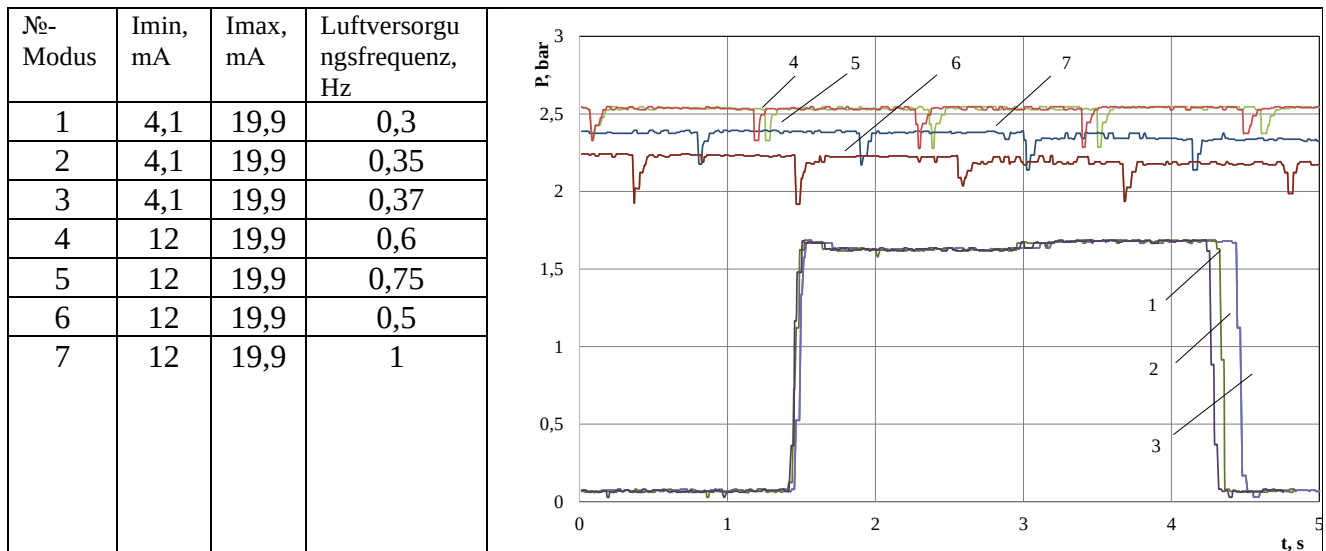
In Tabelle.1. es sind die ergebnisse der modellierung der modi beim pneumotransport des kleinteiligen produktes (getrocknete pfeffererbsen) in den arbeitskanal der rohrleitung des produktes mit verschiedenen bedingungen der bildung des impuls der zusammengepressten luft gebracht. Dadurch ist es möglich, bei mathematischen Modellierungsproblemen die richtigen Druckänderungsbereiche

einzustellen. Der Einfluss von Druckluftdruckstörungen während des Betriebs der pneumatischen Produktlinie kann einen pseudostationären Modus bilden. Wenn die Kurven 1-3, Tabelle.1. beschreiben lange Zeitverzögerungen während der Zufuhr von Druckluft in den Kanal, mehr als 1 s. Dann kann im horizontalen Teil eine stilvolle Schicht untergeformt werden, der Transport ist kompliziert. Kurven 4-7, Tabelle. 3.1. mit Verzögerungsintervallen bis zu 0,2 s ermöglichen die Beschreibung der stationären Art der pneumatischen Förderung unter der Bedingung einer kontinuierlichen Injektion des Produkts. Die maximale Pulsfrequenz beim pneumatischen Transport lag bei bis zu 1,5 ... 20 Hz, bei Drücken bis 2,5 bar.

Die erhaltenen Simulationsergebnisse ermöglichen es, die Abhängigkeiten der wichtigsten kinematischen Parameter des Produkttransports durch mechanische und mathematische Untersuchungen zu beschreiben und den Druckabfall vorherzusagen

Zunächst wurden die Form des Arbeitskanals des pneumatischen Transports und der diametrale Abschnitt des Arbeitskanals berücksichtigt. Mit zunehmender Zeit der Druckluftzufuhr in die Produktleitung erreicht die Anzahl der Extrusionspartikel ein Maximum im Bereich von 0,1 ... 0,2 s (Tabelle 1). Diese Zahl variiert je nach Einstellung des Regelkreises (Tabelle 1). Die Ergebnisse bestätigen [374, S.544] die Möglichkeit, den optimalen Modus für den pneumatischen Transport des Produkts zu bilden.

Tabelle 1. Experimentelle Daten zur Druckänderung im Standkanal



Für einen stabilen Betrieb des pneumatischen Transports beträgt die empfohlene Gasgeschwindigkeit das 1,5- bis 2-fache der Auftriebsrate der Partikel des transportierten Materials (Tabelle 1).

Es wird festgestellt, dass die Schicht aus feinkörnigem Produkt, die den aufsteigenden Druckluftstrom durchdringt, sich in zwei qualitativ unterschiedlichen stationären Zuständen befinden kann. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit unter 5 m/s sind die Feststoffpartikel stationär. Der pneumatische Widerstand steigt mit zunehmender Geschwindigkeit auf 15-20 m/s - die Schicht wird gewogen, feste Partikel verlieren ihren früheren gegenseitigen Kontakt, können sich bewegen und mischen. Die Schicht dehnt sich aus, auf ihrer freien Oberfläche sieht man Wellen und Ausbrüche.

Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigte, dass der gesamte Druckverlust in der Rohrleitung während des pneumatischen Transports besteht aus: Druckverlusten, die während der Bewegung sauberer Luft auftreten; zusätzliche Druckverluste, die während der Bewegung des Materials auftreten; Druckverluste auf der Stütze wird in hängender Position auf dem vertikalen Abschnitt transportiert; Druckverluste bei Beschleunigung des Transports von Partikeln bei ihrer Anziehung in der Transportleitung. Gleichzeitig ermöglicht der vorgeschlagene Ansatz, ähnliche Abhängigkeiten für andere Verkehrsträger zu erhalten.

Die Simulationsergebnisse zum Einfluss lokaler Widerstände auf die Erhöhung spezifischer Druckverluste werden durch Feldversuche bestätigt. Ein Versuchsstand mit einem auf PWM basierenden mechatronischen Steuerungssystem wurde modelliert und aufgebaut. Mittels physikalischer Modellierung wird bestimmt: Der Gasdruck im Strömungskanal für den Flüssiggaskanal ist vorzugsweise 0,1–2,0 bar höher als der Druck im Bypassrohr des komprimierten Gases; Transportgeschwindigkeit beträgt 2 bis 15 m/s; die zwischen dem Übertragungsgerät und dem Verbraucher eingestellten Werte des Druckabfalls liegen zwischen 1 und 20 bar; der Flusssichteindex liegt in Übereinstimmung mit den pneumatischen Systemen zwischen 10 und 200. Die physikalische Modellierung des Prozesses während des Pneumotransports wurde für kleinstückige Produkte mit den oben beschriebenen Betriebsbedingungen und

Produkteigenschaften durchgeführt. Es wurden physikalische und mathematische Modelle des Massentransfers von Schüttgütern unter strukturierten Moden der Luftgemischbewegung entwickelt. Es wird nachgewiesen, dass die Verbesserung der technischen Kennwerte des pneumatischen Transports durch die Intensivierung des Stofftransports durch die Verwendung von Wellen- und Batch-Modi der Luftgemischbewegung erreicht wird, für die der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten des Lagers und der Lagerkomponenten minimal ist. Das mathematische Modell umfasst Differentialgleichungen der Bewegung für einzelne Partikel in der Strömung sowie deren geschätztes Verhalten nach Kollision mit der Innenfläche der Produktleitung und Änderungen ihrer kinematischen Eigenschaften. Die Randbedingungen berücksichtigen den Einfluss der pneumatischen Transportmittel und der Geometrie der Produktleitung. Der Prozess der Steuerung kritischer Moden beim Pneumotransport auf der Grundlage von proportionalen Elementen und Rückkopplungen wird theoretisch untersucht; Untersuchung des Zerstörungsprozesses der Produktcluster durch Luftwellen und kontrollierte Dekompression. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Verwendung des entwickelten Modells es ermöglicht, die Geschwindigkeit zu berücksichtigen und den Druck am Einlass der Produktleitung zu steuern.