

Technische Universität «Bergakademie Freiberg»

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

OLEKSANDR SHEVCHENKO

Thema:

Begründung der Parameter einer pulsierenden Filtermaschine zur Entwässerung
organisch-mineralischer Tiefsee-Sedimente

Fachrichtung – «Bergbaumaschinen»

Zusammenfassung der Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

Freiberg – 2017

Abstract

Die Dissertation begründet die Parameter der pulsierenden Filtermaschine zur Entwässerung feindisperser Suspension, organisch-mineralische Tiefsee-Sedimente aus dem Schwarzen Meer, welche aufgrund der theoretischen und experimentellen Untersuchungen des Filtrationsprozesses beim statischen und pulsierenden Druck, sowie der entwickelten Abhängigkeiten dieser Parameter von Suspensionseigenschaften und Filtrationskennwerten definiert werden können. Es wurde eine neue Konstruktion der pulsierenden Filtermaschine und eine Methodik zur Parameterberechnung in Bezug auf marine Sedimentsuspension entwickelt, sowie die rationellen Betriebs- und Konstruktionsparameter der pulsierenden Filtermaschine definiert. Dabei wurde auch die Effizienz unter Einsatz von pulsierenden im Vergleich zum statischen Druck bei der Sedimententwässerung bewertet.

ALLGEMEINE CHARAKTERISTIK DER DISSERTATIONSSCHRIFT

Aktualität. Die organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimente (OMTS), deren Vorräte im Schwarzen Meer ca. 320 Mrd. m³ betragen, sind zur großen Bedeutung für die ökonomische Entwicklung der Ukraine und andren EU-Ländern geworden. Die Untersuchungen der bulgarischen und ukrainischen Forschers zeigen die Nutzungseffizienz dieses unkonventionellen Rohstoffes in verschiedenen Bereichen, wie z.B.: Agrar-Industrie-Komplex, Medizin und Kosmetologie, Bauwesen u. v. a. m., – daher zählen die OMTS zu wertvollen natürlichen Rohstoffen.

Eines der bedeutendsten Probleme auf dem Weg zur industriellen Nutzbarmachung dieser natürlichen Ressourcen ist die Entwässerung. Die feindisperse Struktur (zu 80 bis 85% besteht das Material aus einer Fraktion < 10 µm), der Gehalt an organischen und mineralischen Substanzen und Salze erschweren die Entwässerung dieses Materiales erheblich.

Da die Gewinnung der Schlämme auf See erfolgt, stehen für eine Entwässerung nur begrenzte energetische Ressourcen und Raum zur Verfügung. Deshalb kommt zunächst nur eine mechanische Entwässerung in Betracht. Dies würde den Transportaufwand reduzieren und eine für das Endprodukt zum Einsatz in der Landwirtschaft geeignete Konsistenz gewährleisten.

Die effiziente Entwässerung der mit Nassbaggern und Greifern gewonnenen Suspension ist nur in Filteranlagen möglich, welche an die spezifischen marinen Bedingungen angepasst werden können und auf diese Weise mit der Gewinnungsausrüstung eine Gewinnungs- und Aufbereitungskette bilden. Unter den Filteranlagen sind die beim Druck funktionierenden Filterpressen für die Entwässerung von feindisperser OMTS-Suspension hochangepasst. Die Hauptparameter dieser Anlagen sind: Überdruckwert, Filteroberfläche, Abstand zwischen den Filterwände, Anzahl der Filterplatten, geometrische Dimensionen der Anlagen und deren Bauteilen, spezifische Leistung (oberflächenbezogen), Filtrationsdauer, Dauer der Zusatzoperationen, sowie Entwässerungsparameter (u.a. Wassergehalt von Suspension und Filterkuchen, Suspensionstyp und Suspensionseigenschaften).

In der Regel sind fast alle in den Betrieben verwendeten Filteranlagen platz- und materialaufwendig. Dabei ist deren Arbeitseffizienz von den Suspensionseigenschaften und der Korngrößenverteilung stark abhängig. Deswegen werden in der Praxis Methoden zur Effizienzsteigerung des Filtrationsprozesses in den Filteranlagen, u.a. mittels thermischer, chemischer, elektrischer und physikalisch-mechanischer Einflussnahme auf die Suspension eingesetzt. Einer der perspektivischen Methoden zur Produktivitäts- und Effizienzerhöhung der Filteranlagen ist die Verwendung von pulsierendem Druck.

Die Entwicklung von Filteranlagen, die unter pulsierendem Druck funktionieren (pulsierenden Filtermaschinen), ist eine sehr aufwendige technische Aufgabe. Die meisten auf diesem Gebiet durchgeführten Untersuchungen haben nie Anwendung in der Praxis gefunden. Angesichts der vielfältigen Faktoren, die auf den Filtrationsprozess beim pulsierenden Druck wirken, fehlen derzeit die Methoden zur Begründung von Parametern der pulsierenden Filtermaschinen zur Entwässerung

feindisperser Suspension. Somit ist noch viel Forschung auf dem Gebiet dieses Prozess notwendig.

Die Begründung der Betriebs- und Konstruktivhauptdaten der pulsierenden Filtermaschine und die Ermittlung deren Abhängigkeiten von Filtrationsprozesskennwerten der feindispersen OMTS-Suspension ist **eine aktuelle wissenschaftliche Aufgabe**.

Verbund der Dissertation mit wissenschaftlichen Programmen, Plänen, Themen. Die wissenschaftliche Hauptarbeit der Dissertation ist mit weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen der State Higher Education Institution "National Mining University" verbunden: „Die Entwicklung der theoretischen Basis für die Bildung und Optimierung der modernen Ausrüstung für die marine Gewinnung der Bodenschätzen“ (2012 – 2014, No. 0112U000871), „Die Methodenentwicklung für das Design der perspektivischen Bergmaschinenkonstruktionen auf der Basis der rekurrenten Metamodellierung“ (2014, No. 0114U006102), „Theoretisch-angewandte Grundlage der Entwicklung von energetisch effizienten und umweltfreundlichen Systemen zur tiefmarinen Förderung von Bodenschätzen“ (2016, No. 0116U004622). Der Autor hat an diesen Projekten als wissenschaftlicher Mitarbeiter teilgenommen. Die Dissertation steht auch im Einklang mit dem „Staatlichen Programm der Entwicklung von mineralischen Ressourcen der Ukraine im Zeitraum bis zum Jahr 2030“, das mit dem Gesetz der Ukraine No. 3268-VI vom 21.04.2011 bestätigt ist und entspricht dem Antrag des EU-Finanzmittel „Horizon 2020“ (No. 689446) vom 21.04.2015.

Ziel- und Aufgabenstellung.

Ziel der vorgelegten Dissertation ist es, die Leistung von pulsierenden Filtermaschinen zur Entwässerung von organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten zu erhöhen, deren Parameter unter Einsatz von pulsierendem Druck zu begründen, die Abhängigkeiten der wesentlichen Parameter der Maschine von den Kennwerten des Filtrationsprozesses zu bestimmen und eine Methodik zur Bestimmung der Parameter der Maschine zu erarbeiten.

Zur Erreichung des vorgegebenen Ziels sind folgende Aufgaben formuliert:

1. Die Methoden- und Anlagenanalyse zur Entwässerung von feindispersen Suspensionen mit mechanischen Verfahren, sowie die Analyse der theoretischen Untersuchungen des Filtrationsprozesses von feindispersen Suspensionen.
2. Bestimmung der Parameter der pulsierenden Filtermaschinen für feindisperse Suspensionen.
3. Bau einer Versuchsanlage zur Modellierung des Entwässerungsprozesses.
4. Durchführung experimenteller Laboruntersuchungen mit statischem und pulsierendem Druck.
5. Erarbeitung von mathematischen Berechnungsmodellen des Entwässerungsprozesses beim statischen und pulsierenden Druck. Einschätzung von entwickelten Modellen mithilfe der statistischen Analysemethoden.
6. Bestimmung der rationalen Parameter der pulsierenden Filtermaschine.
7. Erarbeitung einer Konstruktion und einer Berechnungsmethodik für die Parameter der pulsierenden Filtermaschine.

Hauptidee der Dissertation. Die Effizienz- und Leistungserhöhung der pulsierenden Filtermaschine für die Entwässerung der feindispersen Suspension wird mittels der Verwendung von Druckpulsation und der Berücksichtigung des Einflusses von statischem Druckanteil, dem Dynamikfaktor und der Pulsationsfrequenz auf die technologischen Kennwerte des Filtrationsprozesses realisiert.

Untersuchungsobjekt ist der in einer pulsierenden Filtermaschine verlaufende Entwässerungsprozess von organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten.

Untersuchungsgegenstand sind die Betriebs- und Konstruktivdaten der pulsierenden Filtermaschine für die Entwässerung von marinen organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten und deren Einfluss auf den Entwässerungsprozess.

Untersuchungsmethoden.

Für die Lösung der festgestellten Aufgaben wurde eine Komplexmethode verwendet. Diese Methode setzt sich wie folgt zusammen: Theoretische Untersuchungen des Filtrationsprozesses einer feindispersen Suspension beim pulsierenden Druck, die auf den Grundlagen der Kontinuumsmechanik und Bewegungsgleichungen des viskosen Fluides im porösen Medium (Navier-Stokes-Gl.) basieren; Methoden der physikalischen Modellierung, die bei der Entwicklung der Laborfilteranlage eingesetzt wurden; Methode der wissenschaftlich begründeten Versuchsanordnung unter Verwendung der Regressionsanalysetheorie und der mathematischen Statistik; experimentelle Untersuchungen des Filtrationsprozesses von feindisperser Suspension beim pulsierenden Druck.

Die wissenschaftliche Innovation der erhaltenden Ergebnisse.

1. Es wurde zum ersten Mal ein mathematisches Modell entwickelt, das die Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine ohne Druckpulsation beschreibt. Laut diesem Modell kann die Filtrationsdauer der Tiefsee-Sedimente für einen Druckbereich von 1 bis 7 MPa und Wassergehaltänderung von 68% auf 30% berechnet werden.

2. Es wurde zum ersten Mal ein mathematisches Modell entwickelt, das die Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine mit Druckpulsation beschreibt. Dieses Modell definiert die Filtrationsdauer der Tiefsee-Sedimente in Abhängigkeit von: statischem Druckanteil von 1 bis 4 MPa; Dynamikfaktor von 0,3 bis 0,9; Druckpulsationsfrequenz von 20 bis 60 Hz sowie der Änderung des Suspensionswassergehaltes von 68% auf 30%.

3. Die Effizienz des Filtrationsprozesses von organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten beim pulsierenden Druck im Vergleich zum Prozess ohne Pulsation (bei gleichen Parametern) liegt bei einer Pulsationsfrequenz von 20 Hz bei 40% und bei einer Pulsationsfrequenz von 60 Hz bei > 58%.

4. Bei der Erhöhung des statischen Druckanteil von 1 bis 4 MPa in einer pulsierenden Filtermaschine für die Entwässerung von Tiefsee-Sedimenten, die im Bereich der Druckpulsationsfrequenzen von 50 bis 60 Hz funktioniert, bleibt die Zunahme des spez. Filtratvolumenanteils, verursacht durch den dynamischen Druckanteil, konstant. Dabei hängt dieser Filtratvolumenanteil nur von der Entwässerungsdauer ab.

5. Der Dynamikfaktor hat bei der Sedimententwässerung in der pulsierenden Filtermaschine unter dem pulsierenden Druck von 1 bis 4 MPa mit einer Druckpulsationsfrequenz von 20 bis 60 Hz die geringste Wirkung auf den

Filtrationsprozess, welcher die Druckamplitude charakterisiert. Dabei hat die Änderung dieses Parameters innerhalb des festgelegten Variationsintervalls (von 0,3 bis 0,9) keinen signifikanten Einfluss auf den untersuchten Filtrationsprozess.

Lehrsätze, die in der Dissertation verteidigt werden:

1. Während der Entwässerung von organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten in einer pulsierenden Filtermaschine hängt die Filtrationsdauer exponentiell von der Frequenz des pulsierenden Druckes ab und ist umgekehrt proportional zum statischen Druckanteil, dessen Exponent linear von der Frequenz abhängig ist.

2. Für die Entwässerung der organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimente in der pulsierenden Filtermaschine bis zum Wassergehalt 45-50% sind folgende rationelle Parameter definiert: die Druckpulsationsfrequenz sollte zwischen 50 und 60 Hz liegen; der statische Druckanteil zwischen 1 und 2 MPa; der Dynamikfaktor sollte 0,3 sein; der Abstand zwischen den Filterwände sollte 8 bis 15 mm betragen.

Die wissenschaftliche Bedeutung der Dissertation besteht in der Abhängigkeitsentwicklung der OMTS-Filtrationsdauer in der Pulsationsfilteranlage von folgenden Parametern: dem Überdruck; dem Dynamikfaktor; der Druckpulsationsfrequenz; dem Suspensionswassergehalt; der Mächtigkeit der Suspensionsschicht und den Kennwerten, die die Eigenschaften der feindispersen OMTS-Suspension charakterisieren.

Die praktische Bedeutung der Dissertation besteht in der Entwicklung der Berechnungsmethodik, laut der die rationelle Betriebs- und Konstruktivparametern der pulsierenden Filteranlage, sowie der pulsierenden Filteranlage mit zylindrischen koaxialen Filterelementen und mit dem Filterkuchenausstrag mittels der Schnecke, für die OMTS-Entwässerung bestimmt werden können. Es wurde auch eine neue Konstruktion der Pulsationsfilteranlage für die Entwässerung von feindispersen Suspensionen vorgeschlagen und patentiert.

Realisierung den Dissertationsergebnissen. Die entwickelte Methodik der Berechnung von Parametern der pulsierenden Filteranlage für die OMTS-Entwässerung wurde bei der Entwicklung von Filteranlagen vom Unternehmen „Progress“ (Berdychiv), im Institut für Bergbauentwicklung der State Higher Education Institution „National Mining University“ und vom Unternehmen „Pavlogradugol“ (Pavlograd) eingesetzt. Die Methodik der Berechnung von Parametern der pulsierenden Filteranlage mit zylindrischen koaxialen Filterelementen und dem Schnecken-Filterkuchenausstrag für die OMTS-Entwässerung wurde vom Unternehmen „Okeanmashenergo“ (Dnipro) eingesetzt.

Validität und Authentizität der Arbeitsergebnisse sind mit den Grundmethoden der Kontinuumsmechanik, Bodenmechanik, mathematischen Statistik und Regressionsanalyse, sowie der Theorie der wissenschaftlich begründeten Experimentplanung gewährleistet. Die Authentizität der Ergebnisse sind mit der genügenden Annäherung der experimentellen an die theoretischen Daten verifiziert. Für das mathematische Modell, das das spez. Filtratvolumen bei der OMTS-Entwässerung in der pulsierenden Filteranlage beim pulsierenden Überdruck definiert, beträgt der relative mittlere Fehler der Näherung der experimentellen Daten an das Modell ca. 6%; der Korrelationskoeffizient des Modelles ist 0,986; die

maximale Abweichung der theoretischen Daten von experimentellen beträgt ca. 21% bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit 0,9. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde unter Einsatz von standardisierten Messgeräten und Registriereinrichtungen gewährleistet. Die Adäquatheit der Modelle wurde mittels der mathematischen Statistikmethoden gewährleistet.

Personalbeitrag des Autors besteht in der Abfassung von Ziel, Aufgaben, Lehrsätze und Neuigkeit der Dissertationsarbeit. Der Autor hat theoretische und experimentelle Untersuchungen des Filtrationsprozesses beim pulsierenden sowie statischen Druck durchgeführt und auch die Methodik der experimentellen Untersuchungen entwickelt. Mit der Autorteilnahme wurde die Konstruktion der Laborfilteranlage entwickelt und hergestellt. Hiermit wurde die Methodik der Parameterberechnung von der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung, sowie die entsprechenden mathematischen Berechnungsmodelle entwickelt.

Die Approbation der Dissertationsergebnisse. Die Hauptergebnisse der Dissertation wurden an folgenden Konferenzen vorgestellt und positiv bewertet: 12. Internationale Konferenz für Tagebau und Nassbau (Varna, Bulgarien, 2013); Internationale Konferenz „Contemporary Innovation Technique of the Engineering Personnel Training for the Mining and Transport Industry 2014“ (Dnipropetrovsk, 2014); Internationale Konferenz „Forum of Mining Engineers – 2014“ (Dnipropetrovsk, 2014); 12. Gesamt-Ukrainische wissenschaftlich-technische Konferenz „Poturaev’s Lektüre“ (Dnipropetrovsk, 2014); 5. wissenschaftlich-technische Konferenz der Studenten, Doktoranden und jüngeren Wissenschaftlern „Wissenschaftlicher Frühling – 2014“ (Dnipropetrovsk, 2014).

Publikationen. Die Hauptergebnisse der Dissertation sind in 16 Veröffentlichungen publiziert wurden; davon 9 in fachlichen Verlagen (3 davon in Deutschland), 1 in einem Journal, 5 in Konferenzmaterialien sowie 1 Patent.

Struktur und Volumen der Arbeit. Die Dissertation besteht aus der Einleitung, 4 Abschnitten, Schlussfolgerungen, dem Literaturverzeichnis aus 127 Quellen auf 14 Seiten; einschließlich 122 Seiten von fließendem Text, 44 Seiten mit Bildern und Tabellen und 8 Appendixes auf 34 Seiten.

HAUPTINHALT DER DISSERTATIONSSCHRIFT

In der **Einleitung** wurde folgendes dargelegt: Aktualität des Dissertationsthemas, Ziel- und Aufgabenstellung, Untersuchungsobjekt, Untersuchungsgegenstand, Untersuchungsmethoden, Lehrsätze und wissenschaftliche Innovation, wissenschaftliche und praktische Bedeutung der Dissertation, sowie allgemeine Charakteristik und Struktur der Arbeit.

Kapitel 1 der Dissertationsschrift widmet sich dem Stand der Technik und dem Wissen der Methoden und Anlagen für die Entwässerung der feindispersen Suspensionen (organisch-mineralische Sedimente) mit mechanischem Verfahren.

Dabei werden zunächst die organisch-mineralischen Sedimente des Schwarzen Meeres als Entwässerungsobjekt charakterisiert. Besonders wertvolle Sedimente sind amorphe, strukturlose organisch-mineralische Verbindungen, die Sapropel. Die

Sapropelle lagern in einer Mächtigkeit von 0,3 – 0,5 m unter einer 0,5 – 1,0 m Überdeckung aus kokkolitischen Schlämmen, die auch gemeinsam als technologische Schicht betrachtet werden. Die Hauptmerkmale dieser Sedimente sind eine feinkörnige Struktur (bis zu 85% des Materials besteht aus der Fraktion $< 10 \mu\text{m}$), ein hoher Wassergehalt (bis zu 75%), eine hohe Zähigkeit und Klebrigkeit, sowie ein bestimmter Gehalt an organischer Substanz und Salzen. Dies erschwert die Entwässerung des Materials.

Anhand der durchgeführten Analyse der Entwässerungsmaschinen wurde bestimmt, dass für die Entwässerung von marinen Sedimenten die Filteranlagen bzw. Filterpressen, die mit Überdruck arbeiten, am geeignetsten sind. Den bedeutendsten Beitrag zur Entwicklung der Filteranlagen und Filtrationstheorie haben die folgenden Wissenschaftler geleistet: L. Svarovsky, H. Anlauf, J. Thomas, Shirato, Chi Tien, A. Rushton, V.A. Zhuzhikov, D.E. Shkoropad, I.M. Beloglazov u.a. In den Werken dieser Wissenschaftler wird erläutert, dass der Filtrationsprozess von feindispersen Suspensionen, wie den organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten mit ihren spezifischen Eigenschaften, in Filteranlagen sehr langsam und ineffektiv verläuft. Deshalb werden im Betrieb verschiedene Methoden zur Intensivierung des Filtrationsprozesses verwendet. Eine perspektivische Methode ist die Verwendung von pulsierendem Druck, der mittels Vibration realisiert wird. Der Filtrationsprozess von feindispersen Suspensionen mit der Vibrationswirkung wurde von weiteren Forschern untersucht: S.M. Stoev, Ju.G. Jer'omin, V.D. Varsanofev u.a.

Ein weiteres Unterkapitel geht auf den Stand des Wissens zum Filtrationsprozess feindisperser Suspensionen ein. Es wird erläutert, dass in der Praxis für die Begründung der Parameter einer Filtermaschine, sowie einer pulsierenden Filtermaschine, die empirischen Abhängigkeiten verwendet werden. Die Entwicklung einer sicheren theoretischen Methode, welche den Filtrationsprozess von feindispersen Suspensionen beim pulsierenden Druck beschreibt, ist angesichts des komplizierten Prozessverlaufs, der Vielfalt von Wirkungsfaktoren und Suspensionseigenschaften aufwendig.

Deswegen ist die Begründung der Betriebs- und Konstruktivdaten der pulsierenden Filtermaschine und die Ermittlung der Abhängigkeiten dieser Maschinendaten von Filtrationsprozesskennwerten der feindispersen OMTS-Suspension eine **aktuelle wissenschaftliche Aufgabe**.

In **Kapitel 2** werden die theoretischen Untersuchungen zum Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine vorgestellt. Desweiteren wird die Ermittlung der Hauptparameter der pulsierenden Filtermaschine, sowie der Parameter der Laborfilteranlage aufgezeigt.

Als eine Basiskonstruktion der pulsierenden Filtermaschine wurde die horizontale Kammerfilterpresse angenommen, die mit einem Pulsator konstruiert wurde. Somit wird Konstruktion der pulsierenden Filtermaschine grundlegend erneuert. In Abbildung 1 ist ein Schema der Realisierung vom pulsierenden Druck in einer Kammerfilterpresse dargestellt.

Die Hauptparameter der pulsierenden Filtermaschine sind: statischer p_{st} und dynamischer Druckanteil p_d [Pa] (oder Dynamikfaktor K_d), Druckpulsationsfrequenz Ω [Hz], Filtrationsdauer t [s], Abstand zwischen den Filterwände δ_k [mm].

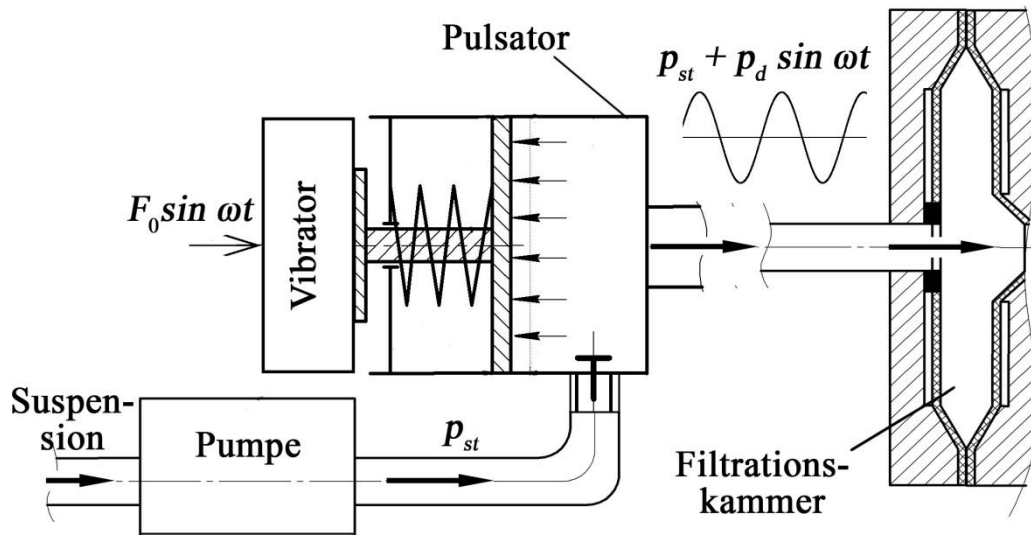


Abb. 1 – Schema der Realisierung des pulsierenden Drucks in einer Kammerfilterpresse

Die Arbeit des Pulsators (Abb. 1) kann mit folgender Differentialgleichung beschrieben werden (Gl. 1):

$$m\ddot{x} + \xi\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

mit m – Gesamtmasse des Pulsators mit Bestandteilen [kg]; $\ddot{x}$ – Kolbenbeschleunigung [m/s^2]; ξ – spez. Widerstandskoeffizient [$\text{N}\cdot\text{s/m}$], der von dem Dynamikfaktor, dem statischen Druckanteil, der Kolbenfläche und der Suspensionseigenschaften abhängig ist; $\dot{x}$ – Geschwindigkeit [m/s]; c – Federsteifigkeit [N/m]; x – Verschiebung [m]; F_0 – Vibrationskraft [N]; ω – Umlauffrequenz [rad/s]; t – Zeit [s].

Für die Abhängigkeitsermittlung der Hauptparameter der pulsierenden Filtermaschine von den Filtrationskennwerten wurde der beim pulsierenden Druck verlaufende Filtrationsprozess in einer Filtrationskammer der Anlage betrachtet. Dabei wurde ein Berechnungsschema (Abb. 2) entwickelt, welches die Strömung einer viskosen und inkompressiblen Flüssigkeit im idealen porösen Medium mit zylindrischen Poren beschreibt.

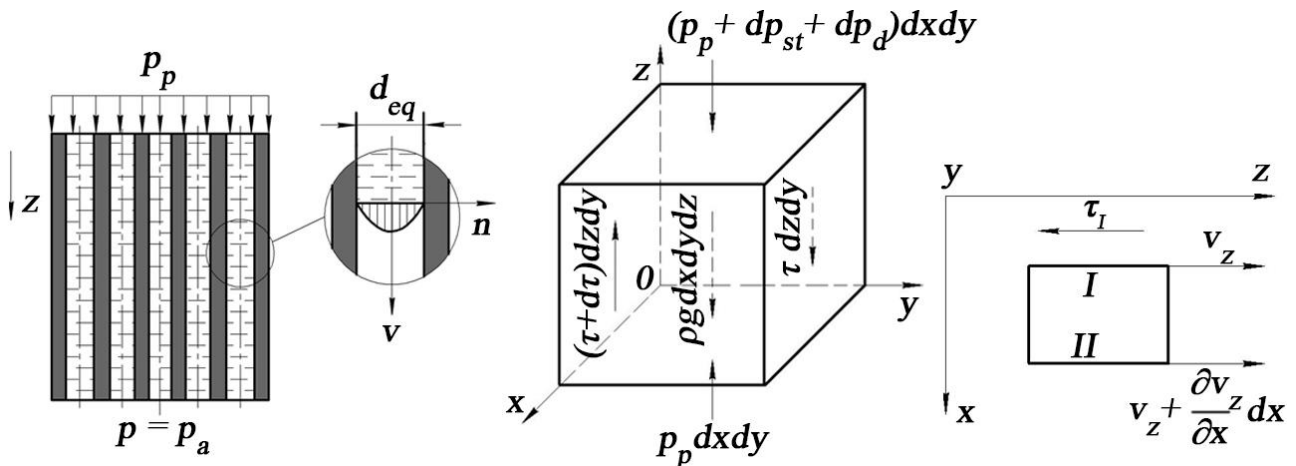


Abb. 2 – Idealisiertes Schema der Flüssigkeitsbewegung im porösen Medium und wirkende Kräfte auf das Einzelvolumen der Flüssigkeit

In Abb. 2 sind dargestellt: p_p – pulsierender Gesamtdruck [Pa]; p_a – Atmosphärendruck [Pa]; n – Normal; v – Flüssigkeitsgeschwindigkeit [m/s]; τ – Scherspannungen [Pa]; g – Gravitationskonstante [m/s²]; d_{eq} – äquivalenter Porendurchmesser [m].

Gemäß dem Schema (Abb. 2) erhält man eine Differentialgleichung, welche die Bewegung vom eindimensionalen Strom der inkompressiblen Flüssigkeit in einer Pore beschreibt. Diese Gleichung (2) stellt eine Form der Navier-Stokes-Gleichung mit Berücksichtigung des dynamischen Druckanteils dar.

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial p_{st}}{\partial z} + \frac{\partial p_d}{\partial z} \right), \quad (2)$$

mit ρ – Flüssigkeitsdichte [kg/m³]; μ – dynamische Viskosität der Flüssigkeit [Pa·s]; v_z – Geschwindigkeitsprojektion auf z -Achse [m/s].

Mithilfe der Methoden der Kriteriummodellierung wurde die Gl. (2) zur Darcy-Gleichung mit der Berücksichtigung des Einflusses des dynamischen Druckanteils überführt:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{p_p}{\mu r_o l'} \quad (3)$$

mit V – Filtratvolumen [m³]; S – Filteroberfläche [m²]; r_o – Filterkuchenwiderstand [m²]; l' – Porenhöhe [m].

Mit Berücksichtigung der Änderung des Suspensionswassergehaltes im Prozess auf Basis von Gl. (3) wird eine Abhängigkeit erhalten, welche die Filtrationsdauer definiert (Gl. 4):

$$t = r_{spez}(p_p) \cdot H^2 \cdot W_\Delta^2, \quad (4)$$

mit $r_{spez}(p_p)$ – spez. Filterkuchenwiderstand [s/m²], der die Flüssigkeitsviskosität berücksichtigt; H – Anfangshöhe der Suspensionsschicht [m]; W_Δ – Parameter, der die Wassergehaltänderung in der Suspension charakterisiert.

Der W_Δ -Parameter aus Gl. (4) wird folgendermaßen bestimmt (Gl. 5):

$$W_\Delta = \frac{\rho_s (W_0 - W_k)}{(W_k - 1)(\rho - W_0 \rho + W_0 \rho_s)}, \quad (5)$$

mit ρ_s – Korndichte der Suspension [kg/m³]; W_0 – Anfangswassergehalt der Suspension; W_k – Filterkuchenwassergehalt.

In **Kapitel 3** der Dissertationsschrift wird folgendes dargestellt: Methoden der Durchführung von Laborversuchen des Filtrationsprozesses einer feindispersen Suspension beim statischen und pulsierenden Druck; Methoden der Aufbereitung von experimentellen Daten und der Entwicklung von mathematischen Modellen für die Berechnung von Parametern der pulsierenden Filtermaschine; sowie Datenanalyse.

Der beim pulsierenden Druck verlaufende Filtrationsprozess einer feindispersen Suspension in einer Filtrationskammer kann in Form eines Strukturdiagrammes mit Ein- und Ausgangsparametern dargestellt werden (Abb. 3). Für jeden Eingangsparameter wurden Niveaus und Variationsintervalle (Tab. 1) definiert.

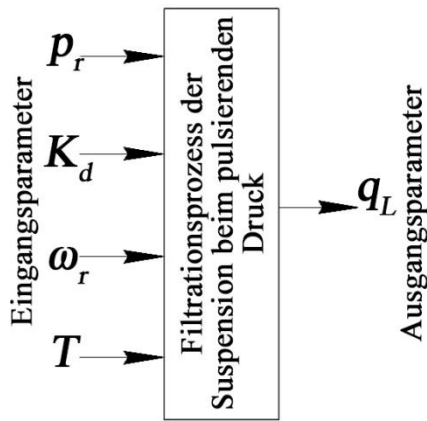


Abb. 3 – Strukturdiagramm des Filtrationsprozesses einer Suspension beim pulsierenden Überdruck

Tabelle 3 – Werte der Niveaus und Variationsintervalle bezüglich der Eingangsparameter

Faktor	kodierter Wert	Variationsintervall c_i	Faktorenniveau		
			«0»	«+1»	«-1»
p_r	X_1	15	25	40	10
ω_r	X_2	1,0	2,0	3,0	1,0
K_d	X_3	0,3	0,6	0,9	0,3
T	X_4	4,5	5,5	10	1

In der Tab. 1 sind: „0“ – Nullniveau (Koordinatenanfangspunkt); „+1“ – oberes Niveau; „-1“ – unteres Niveau; $p_r = p_{st}/p_a$ (beim $p_a = 0,1$ MPa); $K_d = p_d/p_{st}$; $T = t/t_0$ (mit $t_0 = 60$ s (experimentell bestimmt) – der Zeitpunkt am Anfang des Filtrationsprozesses, bei dem eine relative Stabilisierung des Prozesses erreicht ist); $\omega_r = \omega/\omega_0$ (mit einer in der Laborfilteranlage minimalen realisierbaren Umlauffrequenz von $\omega_0 = 126$ rad/s); $q_L = V/(SH)$ – das auf die Suspensionsschichthöhe bezogene spez. Filtratvolumen (bei $S = 0,001$ m² und $H = 20$ mm).

Es wurden experimentell die Haupteigenschaften der Proben von OMTS-Suspension bestimmt: $W_0 \approx 68\%$; $\rho_s \approx 2387$ kg/m³; die mittlere Dichte der Suspension $\rho_0 \approx 1250$ kg/m³; der mittlere Wert von Feststoffkonzentration ist 0,32.

Die experimentellen Untersuchungen des Filtrationsprozesses der OMTS-Suspension beim pulsierenden Druck wurden gemäß *unvollständigem Kompositionsplan* (oder Box-Behnken-Plan) für 4 variierende Faktoren durchgeführt. Während des Versuches wurde die zum Zeitpunkt t erhaltende Filtratmasse gemessen und anschließend das spez. Filtratvolumen q_L erneut berechnet. Es wurden drei Versuchswiederholungen durchgeführt.

Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen des Filtrationsprozesses beim statischen und pulsierenden Druck wurde eine Laborfilteranlage entwickelt. Die entwickelte Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Mittels der konstruierten Laborfilteranlage lässt sich der Filtrationsprozess bei Änderung der geometrischen und technologischen Parameter Suspensionsschichtdicke, statische und dynamische Druckbestandteile, Typs und Fläche des Filtermittels und Pulsationsfrequenz beeinflussen.

In Abb. 4 sind: 1 – Halterung; 2 – Balken; 3 – Unwuchtschwinger; 4 – Gewichtslast; 5 – Filtrationskammer; 6 – Umrichter; 7 – Behälter für Filtrat; 8 – Laborwaage; 9 – Basis; 10 – Computer; 11 – Stock mit Kolben; 12 – Zylinder der Filtrationskamera; 13 – Hülse; 14 – Suspension; 15 – Filterelement.

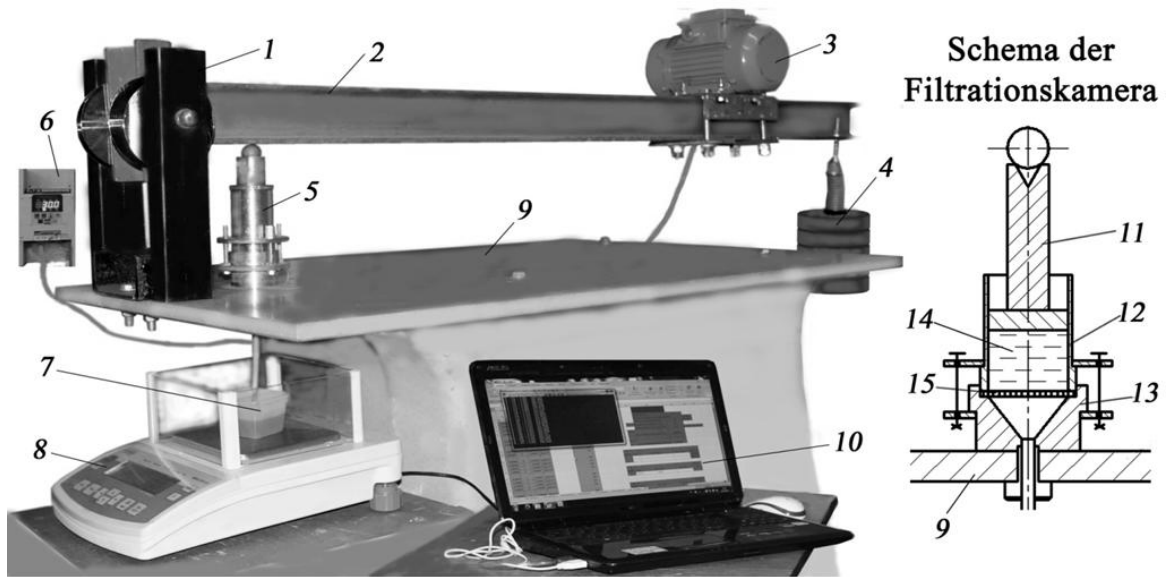


Abb. 4 – Laborfilteranlage

Aufgrund der experimentellen Daten wurde ein mathematisches Regressionsmodell (Gl. 6) entwickelt, welches den Filtrationsprozess der OMTS-Suspension beim pulsierenden Druck beschreibt.

$$q_L = 1,77 + 0,021(X_1 - 25) + 0,11(X_2 - 2) + 0,224(X_4 - 5,5) - 0,018(X_1 - 25)(X_3 - 0,6) + 0,003(X_1 - 25)(X_4 - 5,5) + 0,024(X_2 - 2)(X_4 - 5,5) - 2,7 \cdot 10^{-4}(X_1 - 25)^2 - 0,06(X_2 - 2)^2 - 0,33(X_3 - 0,6)^2 - 0,003(X_4 - 5,5)^2. \quad (6)$$

Der relative mittlere Fehler der Näherung von experimentellen Daten mit Modell (Gl. 6) beträgt 11% und der Determinationskoeffizient des Modelles $R^2 = 0,986$. Die Adäquatheit des Modells konnte anhand des Fisher-Kriteriums bestätigt werden.

Während der Analyse des Modelles (6) wurde festgestellt, dass die Änderung des Dynamikfaktors K_d innerhalb des festgelegten Variationsintervalls (0,3 bis 0,9) keinen signifikanten Einfluss auf den untersuchten OMTS-Filtrationsprozess hat. Deswegen ist der rationelle Wert des K_d -Parameters 0,3. Für $K_d = 0,3$ (konstant) wurde ein folgendes mathematisches Modell entwickelt:

$$t = \frac{b_r e^{-k_2 \omega_r}}{p_r^{0,752 - 0,138 \omega_r}} (K_s - HW_\Delta)^2, \quad (7)$$

mit $b_r = 3,19 \cdot 10^8 \text{ s/m}^2$; $K_s = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ (entsprechend $t_0 = 60 \text{ s}$); $k_2 = 0,61$.

Anhand von Modell (Gl. 7) lässt sich die Filtrationsdauer der OMTS-Suspension beim pulsierenden Druck in der Pulsationsfilteranlage in Abhängigkeit von Filtrationskennwerten, Anlageparametern und Suspensionseigenschaften definieren und daraus die Abhängigkeiten der Filtrationsdauer von den ω_r - und p_r -Parametern (Abb. 5) bei $H = 7 \text{ mm}$ und $W_k = 45\%$ ermitteln.

Während der Analyse des Modells (Gl. 7) und Grafiken (Abb. 5) wurde der **erste Lehrsatz** formuliert.

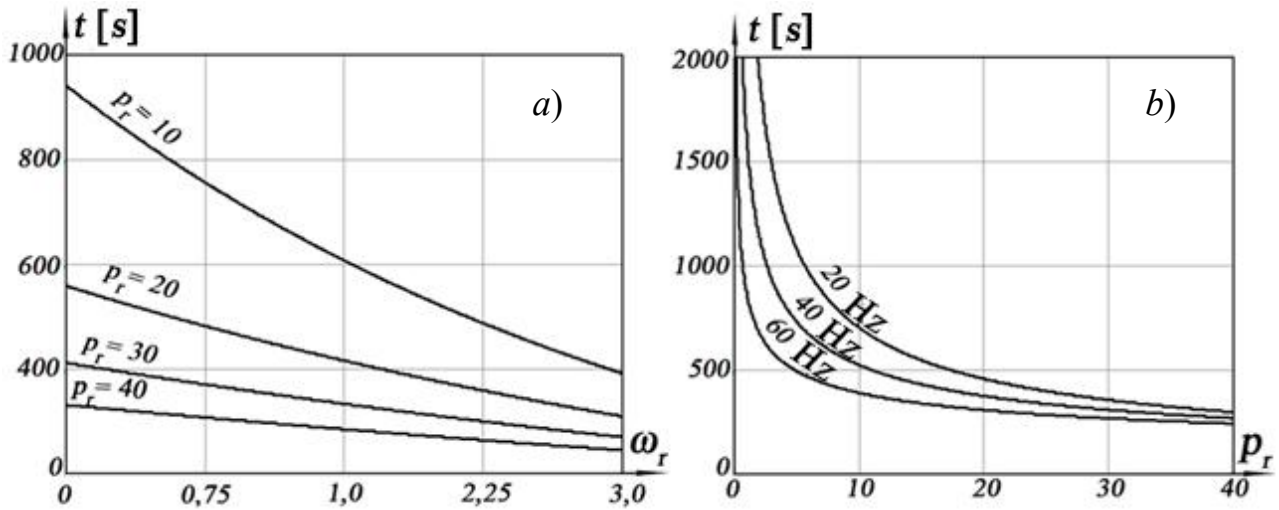


Abb. 5 – Abhängigkeiten der Filtrationsdauer t vom ω_r (a) und p_r (b)

Für die Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine beim statischen Druck (ohne Pulsation) wurde ein mathematisches Modell entwickelt, welches die Filtrationsdauer der OMTS-Suspension definiert:

$$t = a_r p_r^{-k_1} H^2 W_\Delta^2, \quad (8)$$

mit $a_r = 3,109 \cdot 10^8 \text{ s/m}^2$; $k_1 = 0,58$.

Der Verwendungsbereich der Gl. (7) und Gl. (8) mit den Variationsintervallen der Parameter und Sedimenteigenschaften ist begrenzt. Die maximale relative Abweichung der berechneten t -Werte von Messdaten beträgt für das Modell (7) 21% und für das Modell (8) 19% mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 0,9.

Abschnitt 4 der Dissertationsschrift beinhaltet: die Berechnungsmethodik der Maschinenparameter für die OMTS-Entwässerung; die neue (patentierte) Konstruktion und Berechnungsmethodik der pulsierenden Filtermaschine mit koaxialen zylindrischen Filterelementen und Schnecken-Filterkuchenaustrag.

Während der durchgeführten Analyse des OMTS-Entwässerungsprozesses wurden folgende Abhängigkeiten bestimmt (Abb. 6): Die spez. Leistungsfähigkeit v_p [m/s] der pulsierenden Filtermaschine von der Energieintensität W_F [N·m/s] und vom statischen Druckanteil bei einer Druckpulsationsfrequenz von 20 und 60 Hz (a und b); die spez. Leistungsfähigkeit v_p von der Druckpulsationsfrequenz (c); der Filtrationsdauer vom Abstand zwischen den Filterwänden δ_k [mm] bei einer Druckpulsationsfrequenz von 50 Hz (d).

Anhand der Abhängigkeiten (Abb. 6, a und b) lässt sich ableiten, dass mit der Erhöhung des statischen Druckanteils von 1 bis 4 MPa die Energieintensität des OMTS-Entwässerungsprozess sich 5-fach erhöht und dabei die spez. Leistungsfähigkeit der pulsierenden Filtermaschine nur um 32 % zunimmt. Folgendermaßen ist die Erhöhung des statischen Drucks auf über 2 MPa im Filtrationsprozess nicht immer zweckmäßig.

Die Grafiken (Abb. 6, c) zeigen, dass die höchste spez. Leistungsfähigkeit der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung bei einer Druckpulsationsfrequenz von 50 bis 60 Hz erreicht werden konnte.

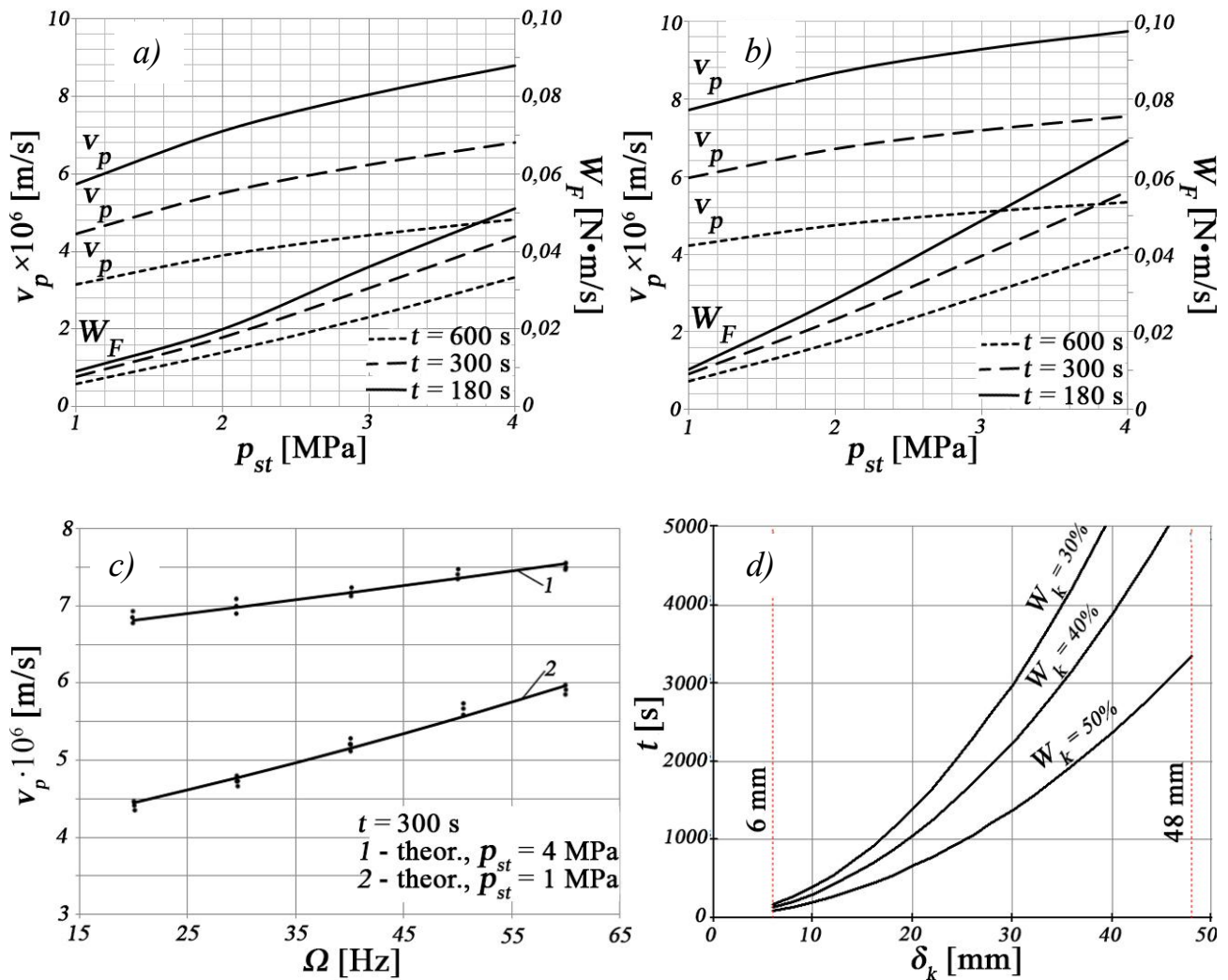


Abb. 6 – Hauptergebnisse der Untersuchungen vom OMTS-Entwässerungsprozess beim pulsierenden Druck.

Der Abstand zwischen den Filtersektionen gemäß Abb. 6 (d) sollte 8 bis 15 mm betragen.

Auf Grundlage der Analyse von Abhängigkeiten (Abb. 6) wurde der **zweiter Lehrsatz** formuliert.

Für die Auswertung der Effizienz unter Einsatz des pulsierenden Drucks bei der OMTS-Entwässerung wurden zwei Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine (beim statischen und pulsierenden Druck) verglichen. Hierbei wurden die Abhängigkeiten der relativen Produktivitätssteigerung Δv_p [%] (im Vergleich zum Arbeitsregime der Anlage beim statischen Druck) von dem statischen Druckanteil und der Druckpulsationsfrequenz (Abb. 7) erhalten.

In Abb. 7 wird ersichtlich, dass die Effizienz des Filtrationsprozesses von organisch-mineralischen Sedimentproben beim pulsierenden Druck im Vergleich zum Prozess ohne Pulsation (bei gleichen Parametern) bei einer Pulsationsfrequenz von 20 Hz bei 40% und bei einer Pulsationsfrequenz von 60 Hz bei > 58% liegt. Dabei wird die maximale Effizienz beim Einsatz von pulsierendem Druck bei einem statischen Druckanteil von 1 MPa und einer Druckschwingungsfrequenz von 60 Hz (innerhalb der angenommenen Intervalle) erreicht.

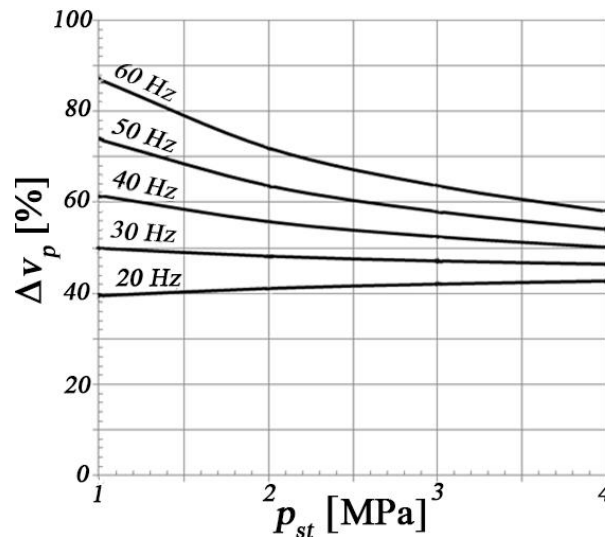


Abb. 7 – Δv_p ist Funktion vom p_{st}

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde eine Berechnungsmethodik für die Bestimmung von Parametern der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung entwickelt, welche in ukrainischen Unternehmen „Progress“ (Berdichiv), Institut für Bergbauentwicklung der State Higher Education Institution „National Mining University“ und „Pavlogradugol“ (Pavlograd) für die Entwicklung von Filteranlagen verwendet. Daneben wurde eine neue Konstruktion der pulsierenden Filtermaschine mit zylindrischen coaxialen Filterelementen und dem Schnecken-Filterkuchenaustrag für die Entwässerung von feindispersen Suspensionen (Abb. 8) entwickelt und patentiert (Patent No. 104312 UA). Die Berechnungsmethodik dieser neuen Anlage wurde im Unternehmen „Okeanmashenergo“ (Dnipropetrovsk) bei der Entwicklung von Filtern für die Abwasserfiltration verwendet.

In der Tabelle 2 sind die Hauptparameter der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung zusammengefasst.

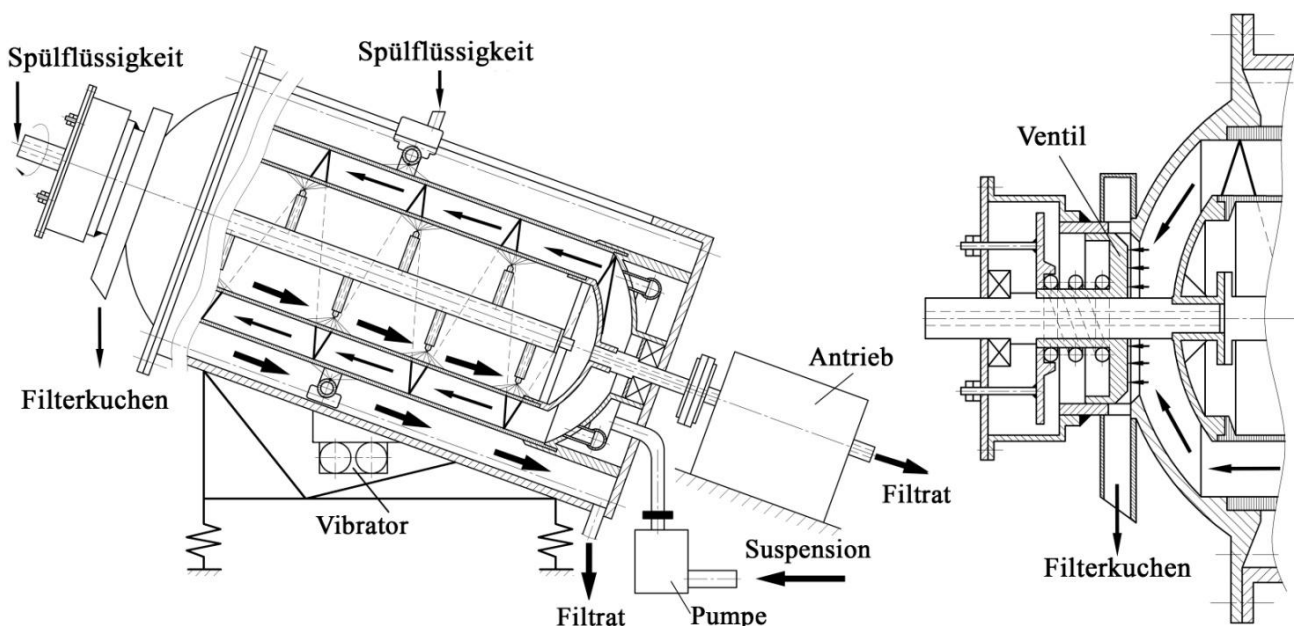


Abb. 8 – Prinzipschaltbild der patentierten Pulsationsfilteranlage

Tabelle 2 – Hauptparameter der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung

Parameter	Intervall der Werten	rationaler Wert
Abstand zwischen den Filterwänden δ_k [mm]	6...48	8...15
Statischer Druckanteil p_{st} [MPa]	1,0...4,0	1,0...2,0
Dynamikfaktor K_d [-]	0,3...0,6	0,3
Druckpulsationsfrequenz Ω [Hz]	20...60	50...60
Filterkuchenwassergehalt W_k [%]	30...50	45...50
Suspensionswassergehalt W_0 [%]	68	–

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Dissertation ist eine abgeschlossene wissenschaftliche Forschungsarbeit. In dieser Arbeit wurde eine wissenschaftliche Aufgabe gelöst, welche in der Bestimmung von Parametern der pulsierenden Filtermaschine für die Entwässerung von marinen organisch-mineralischen Sedimenten bestand. Zu den bestimmenden Parametern gehören der statische Druckanteil, der Dynamikfaktor, die Druckpulsationsfrequenz, die Filtrationsdauer und der Abstand zwischen den Filterwänden. Anhand dieser Parameter wurden deren Abhängigkeiten von den Filtrationskennwerten der OMTS-Suspension bestimmt. Mithilfe dieser Abhängigkeiten lassen sich wiederum definieren: Filtrationsdauer, die exponentiell von der Frequenz des pulsierenden Druckes abhängt und umgekehrt proportional zum statischen Druckanteil ist, dessen Exponent linear von der Frequenz abhängig ist; Quantifizierung der Maschinenparameter; Berechnungsmethodik für die Bestimmung von Parametern der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung.

Wissenschaftlich-praktische Hauptergebnisse der Dissertationsarbeit.

1. Entsprechend der durchgeführten Recherche von Literatur und Patenten wurde bestimmt, dass für die OMTS-Entwässerung die Kammerfilterpressen und die Schneckenfilterpressen am effektivsten sind. Eine der perspektivischen Methoden zur Produktivitätserhöhung der Filteranlagen ist die Anwendung von pulsierendem Druck.

2. Es wurde bestimmt, dass bei der OMTS-Entwässerung in der pulsierenden Filtermaschine unter pulsierendem Druck folgende Abhängigkeit für die Filtrationsdauer besteht: Die Dauer ist direkt proportional der Multiplikation des spez. Filterkuchenwiderstand, der Suspensionsschichthöhe und des Parameters, welcher die Wassergehaltänderung in der Suspension charakterisiert.

3. Es wurde ein Schema und eine Konstruktion der Laborfilteranlage für die Untersuchung des Filtrationsprozesses beim statischen und pulsierenden Druck in einer pulsierenden Filtermaschine entwickelt.

4. Es wurde eine Methodik der Untersuchung des Filtrationsprozesses beim pulsierenden Druck entwickelt. Im Laufe der Untersuchungen wurden die Daten für die Entwicklung von mathematischen Modellen der Prozesse erhalten.

5. Es wurde ein mathematisches Modell für die Berechnung der Filtrationsdauer von der OMTS-Suspension in der pulsierenden Filtermaschine für die Arbeitsregime beim pulsierenden Druck in Abhängigkeit von einem statischen Druckanteil von 1 bis 4 MPa, einem Dynamikfaktor von 0,3 und einer Druckpulsationsfrequenz von 20 bis 60 Hz, bei der Änderung des Suspensionswassergehaltes im Bereich von 68% auf 30% entwickelt. Die maximale relative Abweichung der nach dem Modell berechneten und experimentellen Daten beträgt 21% bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 0,9.

6. Während der Entwässerung von organisch-mineralischen Tiefsee-Sedimenten in einer pulsierenden Filtermaschine hängt die Filtrationsdauer exponentiell von der Frequenz des pulsierenden Druckes ab und ist umgekehrt proportional zum statischen Druckanteil, dessen Exponent linear von der Frequenz abhängig ist.

7. Es wurde ein mathematisches Modell für die Arbeitsregime der pulsierenden Filtermaschine beim statischen Druck vom 1 bis 7 MPa entwickelt. Laut diesem Modell kann die Filtrationsdauer der OMTS-Suspension, bei deren Wassergehaltänderung von 68 auf 30%, berechnet werden. Die maximale relative Abweichung der theoretisch nach Modell berechneten und experimentellen Daten beträgt 19% bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 0,9.

8. Bestimmt wurden die rationellen und konstruktiven Parameter der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung bis zu einem Wassergehalt von 45 bis 50%: die Druckpulsationsfrequenz von 50 bis 60 Hz; der statische Druckanteil von 1 bis 2 MPa; der Dynamikfaktor 0,3; der Abstand zwischen den Filterwände von 8 bis 15 mm.

9. Es wurde eine neue Konstruktion der pulsierenden Filtermaschine mit zylindrischen koaxialen Filterelementen und dem Schnecken-Filterkuchenausstrag für die Entwässerung von feindispersen Suspensionen entwickelt und patentiert. Dazu wurde auch die Berechnungsmethodik von Parametern dieser Anlage in Bezug auf OMTS-Suspension entwickelt und im Unternehmen „Okeanmashenergo“ (Ukraine) eingesetzt.

10. Es wurde eine Berechnungsmethodik für die Bestimmung von Parametern der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung entwickelt, welche in ukrainischen Unternehmen „Progress“, Institut für Bergbauentwicklung der State Higher Education Institution „National Mining University“ und „Pavlogradugol“ verwendet wird.

11. Es wurde festgestellt, dass bei der Druckpulsationsfrequenz im Bereich von 50 bis 60 Hz und dem statischen Druckanteil 1 MPa die spez. Leistungsfähigkeit der pulsierenden Filtermaschine für die OMTS-Entwässerung mehr als auf 48% im Vergleich zum Arbeitsregime der Anlage ohne Druckpulsation (bei den gleichen Zeitintervallen) zunimmt. Dabei beträgt die Leistungsfähigkeitserhöhung für den Druckintervall von 3 bis 4 MPa im Durchschnitt 21%.