

高等学校教学用书

31939

地下水力学

上册

苏联 維·納·謝爾加切夫等著



燃料工业出版社

高等學校教學用書

地下水力学

上册

苏联 維·納·謝爾加切夫教授 布·貝·拉甫克教授著

北京石油学院科学研究科翻譯組譯 林平一校

苏联高等教育部批准作為石油高等学校教材

燃料工業出版社

高 等 学 校 教 学 用 书

地 下 水 力 学

下 册

苏联 維·納·謝尔加切夫教授 布·貝·拉甫克教授著

北京石油学院科学研究科翻譯組譯 林平一校訂

苏联高等教育部批准作为石油高等学校教材

石 油 工 業 出 版 社

598E

6140\2

2117

這是一本專為石油學院「地下水力學」這門課程編寫的教材。地下水力學是石油和天然氣採取工學的基礎，這裏面包括有關滲濾理論，各井相互作用，彈性驅動方式以及氣體和混氣液體在含油、氣層中流動的一些基本問題。本書所具特點，是既淺顯明瞭，又嚴正面科學地把全部課程內容闡述出來，並處處把理論和實用密切結合。

全書分為五編：上冊包括第一編，本課所研究的目標和內容概述；第二編，滲濾理論；第三編到第十四章為止，包括本編一部分有關液、氣體和液體混合物在不同滲濾狀態，不同油層驅動方式下以單向或徑向向井流動各種問題。至於第三編的後一部分，以及第四編，第五編，也是繼續研討地下水力學在油、氣採取方面的問題，則均列入下冊。

本書除供石油學院作為教材，並供油、氣採取工程技術人員和地質工作人員進修之外；亦可作為從事水文地質，水力工程，工程地質工作人員以及科學研究工作參考。

本書譯稿除由林平一同志擔任校訂而外，並曾由石油學院採油系教授王徽審讀校正。

地 下 水 力 學

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРАВЛИКА

上 冊

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社 (ГОСТОПТЕХИЗДАТ)
1949 年列寧格勒俄文第一版翻譯

蘇聯 В. Н. ЩЕЛКАЧЕВ Б. Б. ЛАПУК 著

北京石油學院科學研究科翻譯組譯 林平一校

燃料工業出版社出版 (北京前門外大街26號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：姚祖誥 校對：汪立群 徐小芝

書號 552 油 90

850 × 1092 1/32 開本 * 11 1/2 印張 * 292 千字 * 定價 (8) 一元七角五分
一九五五年十月北京第一版第一次印刷 (1—1,600 冊)

本册接續上册，从第三編第十五章起，至第十八章，講試井；兩種液体在油層內的重率差對於井內压力分佈和動態的影响；液气体在滲透率不均匀油層內的流動；水驅油、气藏等問題。第四編專講各井之間相互干擾作用的理論，液体和气体向一个井的非徑向流動。第五編講地下水力学的微分方程式，地下水力学發展簡史。書內所引参考文献全部刊於本册之末。地下水力学理論与实验的相結合，不但給採油工学奠定了更为有利的基礎，从而使採油工作者能够合理地開採油田和提高採油率；並且對於油田地質探勘工作者，在水文探勘边水运动学方面，也給予不少的指示。

本書上、下册均由北京石油学院科学研究科朱德懿同志翻譯，水利教研室林平一同志校訂。

В. Н. ЩЕЛКАЧЕВ Б. Б. ЛАПУК

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРАВЛИКА

根据苏联國立石油燃料科技書籍出版社1949年列寧格勒第一版翻譯

書号 100

地 下 水 力 学

下 册

北京石油学院科学研究科翻譯組譯

林 平 一校訂

*

石油工業出版社出版（地址：北京六鋪炕石油工業部）

北京市書刊出版業營業許可証出字第083号

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

830×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 9*印張 * 259千字 * 定價(8)一元四角八分

一九五六年一月北京第一版第一次印刷(1—1,300册)

原編者的話

地下水力学——有關液体、氣體以及二者的混合物在岩層孔隙和裂縫中流動的科学——開採油、氣田的理論基礎，这是高等石油学校中採油系和地質系教学計劃中的專業課程之一。

包含在多孔介質中的油、氣、水形成一個整個的水力体系这一概念，就是作為地下水力学的基礎。

地下水力学主要是由苏联許多科学家辛勤勞動集体創建成功的。本書是从 1941 年起開始在高等石油学校 講授的 [地下水力学] 這門課程的第一本教材。

貫串全書從開始到最後一章為止，都是鮮明而確切地証明，在解决液体和氣體在多孔介質中運動的理論這一個最重要問題上，苏联科学家實據有優先地位。這裏面包括有關滲濾理論、各井的相互作用、彈性驅動方式、氣體和混氣液体在地層中流動等項基本問題。[地下水力学] 這一本教材不僅僅是綜括有關地下石油流体力学方面已有的一切成就，並且還要把這門科学提高到更新的階段。

這本書的特殊價值，在於既能淺顯明瞭，又能嚴正而科学地把全部課程加以闡述。

作者面臨最重要的任務——要使地下水力学這一門学科不僅對於高等石油技術学校大学生易於瞭解，而且對於範圍極為廣大而從事石油及天然氣工業中的工程技術人員也容易看懂。這本書的出版，這一個任務可算是順利地解决了。

最關重要的一點，就是本書所有理論上的說明，都能做到理論和實際应用構成有机的联系。本書一切理論上的說明，都能够看到有解答所有提出問題工程上的处理办法。

地下水力学這一門課程，在石油和天然氣採取工業的幹部培养方面，以及保證這一門對工業技術進一步提高方面所具的價值，是很难作出過份地估計的。因此，我特別祝賀我最親近的学生所著這本書的出版。

Л. С. 列依本森院士 1949 年 6 月 29 日

原 序

地下水力学是现代採油和採氣工学的基礎，並且在水文地質、水力工程、工程地質各方面的应用上都有廣闊的領域。地下水力学这一門課程从1940年開始，就已經列入石油学院的教学計劃。

H. E. 茹可夫斯基教授、H. H. 巴夫洛夫斯基院士和Л. С. 列依本遜院士等人的著作，給全世界最卓越的蘇維埃學派致力於滲濾理論研究的科學家們奠定了基礎。蘇聯科學家們經久保持着研究地下水力学和水力学裏面最關重要的一些問題的優先地位。雖然如此，但是一直到現在，不論是在蘇聯或者是在國外都還沒有編寫出敘述足夠完全，條理井然，而又為初學這門課程以及對於採油和採氣工学上各項問題具有興趣的讀者易於瞭解的一本地下水力学。顯然，必須有這樣的一本書，早就感覺迫切。需要有關於地下水力学這門課程的專業性教材，不僅是對於石油學院的學生，並且對於1942年以前畢業（也就是在高等學校裏沒有學過地下水力学這門課程的）而現在在石油、天然氣工業各有關部門工作的這樣廣大的工程師和地質工作者，這樣一本書也同樣有迫切的需要。

考慮到這一點，就是一些工程和地質幹部，必須獨立地來進行地下水力学這門課程的學習，因此，作者儘可能注意到在敘述上要容易理解，在理論說明上要結合到實際。我們認為後面這一點即使對於大學學生，也是特別有益的。

由於估計到，地下水力学这一門課程在石油學院或者是在油礦地質、油田開採、水文地質等課程之前，或者是在同時（按照各系的情況而定）講授的，所以我們就不得不簡略地介紹一下有關地下水分類以及有關含油、氣、水層驅動方式分類的知識。

本書是依據下述綱要編寫的：

第一編闡明本課程所規定的目標，扼要敘述本課程所包括的內容，概論在地下水力學發展中一些最重要的階段，解釋這門科學的基本概念以及敘述油、氣、水所具有的一些物理性質。要是在序論部分裏面就詳細羅列地下水力學的發展史，也就是說，在讀者還沒有諳悉這門科學的理論基礎以前，就要把地下水力學發展的歷史向讀者提出，我們認為這是不妥當的。在本書的中間幾章課文裏面，偶然也會碰到有關某些歷史方面的知識，但對於地下水力學發展史有系統的綜述，則是在本書的最後一章。

第二編闡述滲濾理論。

第三編內，則收集了那些認為可以簡單解答的地下水力學問題，就是可以應用微分積分學來解決的一些問題。這些問題，如用液體和氣體在多孔介質中流動的一般微分方程式，也可以得到解決。甚至後面這一種解決問題的方式還會更簡短一些，但對於初學者來說，毫無疑問，是要比較困難一些的。第三編所收集的，是講到各種液體、氣體和液體混合物在不同滲濾狀態下和不同的油層驅動方式下向一口井成為單向流動以及成為徑向流動的一些問題。第三編還研究了一些作為例外的問題，這些要由複雜水動力學來解答的問題，是不可能列入本書範圍以內的；由於考慮到這些問題的重要性（基本上是和液體、氣體向水動力學上不完善的井流動有關，以及兩種不同重率的液體向井內流動有關的一些問題），我們只是限於說明這些問題的提出，並對於已經得出的解答進行分析而已，這些已經得出的解答，是一些用數字表和曲線圖說明的計算公式。

第四編包括流向井內非徑向液流的理論、多井相互干擾作用的理論以及在相互作用的各井開採過程中含油邊緣收縮規律的研究。要精確地來解決所有這些問題，就得應用到與複變函數論和偏微分方程式應用有關的水動力學上一些方法。

由於考慮到本教材所規定的任務，我們不可能把這些問題的解答——用以計算公式的理論，都引証出來。而這些問題對於採油和採氣工學的理論上和實用上又最關重要，對於這些問題完全

不加以研究又不可能。因之，我們力求採用易於明瞭的方式來對於適當的一些問題進行說明：詳細闡述每一個問題在物理學上所建立的基礎，說明解決這些問題的一般方法，引用現成的答案——現成的計算公式以及從每一公式所得出的推論。還要順便常常指出一些參考論文和書籍，以便基礎比較好的讀者，能夠找到這些問題適當完全的解答。

第五編包括液體和氣體在多孔介質中流動一般微分方程式的理論，這些方程式在最簡單情況下的積分，水電比擬和水熱比擬。讀者掌握了這一部分材料以後，就易於轉向有關地下水力學和氣體動力學專門性論文的研究。

從地下水動力學最新成就中有關油層水驅系統內彈性驅動方式的一些理論問題來看，本書是敘述得很少。首先是限於本書的篇幅沒有餘地，而另一原因，則是由於在不久以前已經印行有B. H. 謝爾加切夫教授的專題論文[219]，在這篇論文中，所論述彈性驅動方式的理論，又是這樣易於了解，因此，就可以把這一篇論文作為本書的補充教材。

在本書手稿付印的準備工作完成以後，就發表了И. А. 卡爾寧[189]教授專論地下水力學的文章，但我們沒有來得及把這篇文章採用。恰恰是和這一樣，我們也沒有能夠把已經準備好相同時期就要發表的莫斯科石油學院設計研究室全體工作人員的一本巨著[79]採用進去，而在那本巨著裏面，是廣泛地採用地下水力學許多最新成就來解決油田開採上一些最關重要問題的。

本書基本上是供石油學院學生和石油、天然氣工業中工程技術人員和地質工作者應用的，但本書也可作為從事研究水文地質學、水力工程以及工程地質方面工作人員的參考讀物。

按照石油學院地下水力學課程的大綱，在學習本書時，有些章節是不一定要學習的，在正文和目錄中，我們指出了這些章節，並標有[*]的標號。

這些章節當中，包括：第二章§2—3，第三章§1—3，第十二章§2，第十五章§1—6，第十六章§3，第二十章§4, 5, 9, 10，第

二十一章§4—7，第二十三章全章。

初次試編有系統地適合於地下水力学這樣專業性的教材，毫無疑義，不可能沒有漏略和缺陷的地方；作者希望任何方面讀者提出對於本書的批評意見，表示無限感謝，這樣可以幫助改善，並且使這本書能夠對於油、氣開採工学的理論和實用方面起有一定的作用。

由於我們祖國的社會主義經濟，是建立在科學的基礎之上的，所以地下水力学這一門課程就是工程師們和石油-地質工作者進一步改進開發和開採油、氣田方法重要的武器。

附註：本章第二編和第三，十一到十三，十八，二十二章是B.B. 拉甫克教授編寫的；第一（第三章除外）編，第四編以及第八到十，十四到十七和二十三章是B.H. 謝爾加切夫教授編寫的。

1949年1月，莫斯科

目 錄

原編者的話

原 序

第一編 緒 論

第一章 本課程內容，地下水力學發展最重要階段的評述	1
§1. 地下水力學是油、氣開採工學的基礎	1
§2. 地下水力學發展最重要階段的概述	4
第二章 地下水力學的基本概念	7
§1. 有關促成採油工學和地下水力學問題綜合的一些概念發展的情況	7
§2.* 井相互作用和油、氣田相互作用的觀測	12
§3.* 地下水分類的概述	17
§4. 有關含油、氣、水層驅動方式的分類簡述	20
§5. 油層水驅系統的標準略圖和模型	25
第三章 液體和氣體性質的簡述	31
§1.* 石油的性質	32
§2.* 油層水的性質	42
§3.* 油、氣田內氣體的性質	45

第二編 滲濾理論

第四章 基本概念	50
§1. 滲濾的定義及其特性。理想土壤層和假想土壤層	50
§2. 假想土壤層的孔隙度和空隙度(透光度)	52
§3. 由假想土壤層轉變為自然土壤層	59
§4. 液流的滲濾速度和液流的流動速度之間的關係	61
第五章 關於液體滲濾定律各理論公式的敘述以及這些公式的綜合	63
§1. 假想土壤層內的滲濾定律	63

§2.	敘述滲濾定律的各種理論公式的綜合表達式	67
第六章	直線滲濾定律。多孔介質的滲透率	68
§1.	滲濾係數	68
§2.	多孔介質的滲透率	74
第七章	直線滲濾定律的適用範圍以及其他的滲濾定律	82
§1.	有關直線滲濾定律適用範圍問題的實驗研究	82
§2.	關於直線滲濾定律適用範圍這一個問題理論上的研究	83
§3.	非直線的滲濾定律	93
§4.	根據應用因次一致性原則導出的滲濾定律結論	95
第三編 易於簡單解答的地下水力學上一些問題		
第八章	最簡單的滲濾以及研究這些滲濾的方法	101
§1.	一些最簡單滲濾的敘述	101
§2.	水頭和折算壓力；等水頭面和等壓綫	105
§3.	研究單向液流，平面徑向液流和三度徑向液流的 一般方法	108
第九章	在水驅方式下不可壓縮液體的單向流動和 徑向流動	111
§1.	按直線滲濾定律的單向流動	111
§2.	按直線滲濾定律的平面徑向流動	117
§3.	按直線滲濾定律的球形徑向流動	132
§4.	在非綫性滲濾定律情況下的單向流動	137
§5.	在非綫性滲濾定律情況下的徑向流動	138
§6.	在油層內同時有兩種滲濾狀態存在時向井流動所具的 特性	141
§7.	壓力隨時間逐漸變化所發生的影響	147
第十章	帶自由面液體流動的最簡單情況	149
§1.	引 論	149
§2.	帶自由面液體流向直綫廊道的流動	150
§3.	帶自由面液體流向井內的流動	155
第十一章	可壓縮液體在多孔介質中按直線滲濾定律的單 向流動和徑向流動	162
§1.	可壓縮液體的單向穩定滲濾	162

§2. 可壓縮液体的徑向穩定滲濾·····	168
§3. 關於可壓縮液体不穩定徑向滲濾問題的近似解答·····	171
§4. 可壓縮液体的單向不穩定滲濾·····	181
§5. 關於在彈性油層內可壓縮液体不穩定流動問題的 近似解答·····	185
第十二章 氣體在多孔介質中的單向流動和徑向流動 ·····	186
§1. 氣體滲濾定律。氣體在多孔介質中流動的實驗研究·····	186
§2* 關於氣體在多孔介質中流動時的熱力學過程·····	190
§3. 遵循直綫滲濾定律的氣體單向穩定流動·····	193
§4. 遵循直綫滲濾定律的氣體徑向穩定流動·····	202
§5. 遵循直綫滲濾定律的氣體不穩定徑向流動·····	213
§6. 不受直綫滲濾定律支配的氣體穩定流動·····	226
§7. 真實氣體在多孔介質中按直綫滲濾定律的流動·····	235
第十三章 非均質液体在多孔介質中的流動 ·····	246
§1. 總 述·····	246
§2. 多孔介質的相(有效)滲透率·····	249
§3. 混氣液体在多孔介質中的穩定流動·····	256
§4. 混氣液体在多孔介質中的不穩定徑向流動·····	265
§5. 油水混合物在多孔介質中的流動·····	279
§6. 油、氣、水混合物在多孔介質中的流動·····	284
第十四章 井的半徑以及井的水動力不完善程度對於 井排液率所發生的影响 ·····	291
§1. 井的半徑對於井的排液量所發生的影响·····	291
§2. 水動力不完善程度對於井的產量所發生的影响·····	306

第十五章 有關試井流量的某些問題	327
§ 1.* 引 論	327
§ 2.* 井停工後井底压力变化的規律	327
§ 3.* 井在穩定的工作方式下對於指示曲綫形狀有影響的一些因素	331
§ 4.* 指示曲綫的分類及其解析式	334
§ 5.* 井生產指數的最重要性質	338
§ 6.* 對於試井方法的幾點意見	344
第十六章 兩種液体在油層內的重率差對於井內压力分佈和動態的影響	347
§ 1. 底水流向油井井底上昇現象的分析	347
§ 2.* 關於某些水文地質問題的幾點意見	353
第十七章 液体和气体在滲透率不均勻油層內的流動	354
§ 1. 引 言	354
§ 2. 液体在非均勻油層內的單向流動	355
§ 3. 液体在非均勻油層內的平面徑向流動	358
§ 4.* 不可壓縮液体按克拉斯諾波夫斯基滲濾定律流動的情況 下油層不均勻性的影響	373
§ 5. 前述一些結論的綜合	377
第十八章 水驅油和氣	380
§ 1. 關於水驅油的單向流動問題	382
§ 2. 在平面徑向流動情況下的用水驅油	382
§ 3. 關於水驅氣的單向滲濾問題	388
§ 4. 在徑向滲濾情況下的水驅氣	406
§ 5. 在用水驅氣時, 气体黏度對於含水邊緣推進所發生影響的意見	414
第四編 向一口井的液、气体非徑向流動, 以及井與井間相互干擾的理論(能用各種流体動力學方法解決的一些問題)	

第十九章 从注入(增压)井流向生產井的滲流, 以及液、 气体向一口井成非徑向流動的研究。並闡述 液源供給區的邊緣形狀對於井產量和油層压 力分佈的影响	417
§ 1. 有關提出这些問題的幾點意見	417
§ 2. 从注入井到生產井的滲流的研究	419
§ 3. 在液源供給區为直綫邊緣的情况下, 液体向井的非 徑向流動	433
§ 4. 当液源供給區邊緣为圓形時, 液流的非徑向向井流 情况	435
§ 5. 液源供給區邊緣的形狀對於井產量所發生的影响。在 液体非徑向向井流情况下, 關於应用徑向液流一些 公式進行計算的可能性的幾點意見	439
第二十章 油井相互干擾作用的理論	443
§ 1. 一些基本問題的提出	443
§ 2. 表示兩井在工作時相互干擾作用所具特徵的一些基 本公式	452
§ 3. 在兩井相互干擾作用下, 來分析等压綫族、軌跡族 以及滲濾速度在油層內的分佈	463
§ 4.* 在發生相互干擾作用过程中, 有關削弱二井中 的一口井的最簡單問題的解法	472
§ 5.* 相互干擾作用各井生產指數的特性	473
§ 6. 兩井相互干擾作用所發生的效应在數量上的評價	480
§ 7. 环形井組內各井的相互干擾作用	485
§ 8. 在各井沿直綫和沿正方形格子配佈的情况下, 評定多 井相互干擾作用的效应	492
§ 9.* 相互干擾作用各井的最簡單的水動力場的分析, 以及在油層 內的不滲透边界對於各井在工作上所發生影响的結論	500
§ 10.* 在油層內存在有不滲透边界的情况下, 直綫井組中 各井相互干擾作用效应的評價; 直綫排液道和直 綫井組在產量上的比較	508
第二十一章 含油邊緣向井收縮的最簡單規律。關於 井位合理配佈各种方法的結論	513

§ 1. 提出这些問題的幾點意見	513
§ 2. 各种不同形狀的含油邊緣，向一口井收縮的情況	515
§ 3. 含油邊緣向相互干擾作用兩井收縮的情況	519
§ 4.* 含油邊緣向环形井組各井收縮的情況	526
§ 5.* 橢圓形伸長的含油邊緣向橢圓形長軸上各井收縮所具的特性	531
§ 6.* 含油邊緣向三面被封閉住的油層內單排井組收縮所具的特性	534
§ 7.* 關於在水驅油層內井位配佈的幾點意見	539
第五編 地下水力学的微分方程式。結論	
第二十二章 液、气体在多孔介質中，按直綫滲濾定律流動的微分方程式，以及这些微分方程式在最簡單情況下的積分	
§ 1. 均質液体和均質气体，在不變形多孔介質中流動時的連續方程式	544
§ 2. 成滴可壓縮液体和不可壓縮液体，在不變形多孔介質中流動的方程式	548
§ 3. 气体在多孔介質中流動的方程式	555
§ 4. 混气液体在多孔介質中的流動	565
§ 5. 可壓縮液体在彈性多孔介質中流動的微分方程式	568
§ 6. 液、气体在多孔介質中流動的情況与其他一些物理現象的類比	572
第二十三章 地下水力学的發展簡史。結論	
参考文献	
	587

第一編 緒 論

第一章 本課程內容，地下水力学發展 最重要階段的評述

§ 1. 地下水力学是油、氣開採工学的基礎

地下水力学是研究有關於油、氣、水在有孔隙和裂縫的岩層所組成的含油層內流動的一門科學。

如果从水力学這一個名詞的字面意義來考慮，則把油、氣和水在含油層內流動的科學，叫做在多孔介質中的液體和氣體力学，就要更正確一些^①。後一名詞之所以更為正確，是因為在研究液體和氣體在多孔介質中滲濾這一個問題時，所要採用的不祇是水力学上簡單化方法，並且還要用到數學上相當精密、流体力学上的一般方法。然而，為了簡單起見，我們仍舊沿用這門科學的慣用名稱，這一個慣用名稱，早已相沿成習把這門數學科目定名為「地下水力学」了。

應用任何一種方法採取油、氣時，都會激起油、氣在含油氣層內的流動；所以，沒有地下水力學的知識，就不可能有所根據來解決採油和採氣工學方面一些最重要的問題——不可能選擇出，對於某些含油、氣層情況來說，是最為合理而同時又是最能滿足計劃經濟上要求的油、氣田開發方案以及油、氣井採取的驅動方式。

一方面表明通曉地下水力学一些定律對於解決採油工學問題的必要性，另一方面還應當着重指出，祇是通曉這些定律對於研究液體、氣體在含油、氣層條件下的複雜滲濾過程來說，還是不夠的。實際上，多孔介質的比面（孔隙岩層岩樣在單位體積內

① 大家都知道，水力学這一個專名，是源生於兩個希臘字的結合：一個是「хюдор」——水，而另一個是「ауλος」——管子。