

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПЕРЕДАЧІ СОЛЕНОСНИМИ ПОРОДАМИ ГІРСЬКОГО ТИСКУ НА ОБСАДНУ КОЛОНУ

*І. М. Ковбасюк\*, І. І. Чудик, О. Б. Марцинків, М. В. Сенюшкович*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел.(0342) 727137,  
e-mail: drill@nuing.edu.ua*

*Проведено аналіз промислових даних з пошкодження обсадних колон на родовищах Бориславського та Долинського нафтопромислових регіонів. Встановлено, що найсуттєвішими негативними чинниками, які впливають на збереження цілісності обсадних колон, є наявність у геологічному розрізі свердловин інтервалів залягання солених порід та неврахування можливої дії гірського тиску під час проектування обсадних колон у зазначених відкладах. У солених гірських породах за певних умов на колону може передаватися гірський тиск. Для вивчення термобаричних умов передачі зовнішнього тиску обсадній колоні від соленої породи було проведено експериментальні дослідження з кернам матеріалом порід воротищенської світи, відібраного на різних глибинах Орів-Уличнянського родовища. З цією метою було виготовлено спеціальну лабораторну установку, яка дозволяє досліджувати напружений стан і плинність гірських порід під дією пластової температури і гірського тиску. Оскільки прямий замір радіального тиску, який передавався на трубку, та температури всередині камери під час проведення експериментів ускладнений, було проведено тарування установки за тиском і температурою. Це дозволило визначати температуру всередині камери за величиною напруги, що подавалась на нагрівальний елемент, а величину радіального тиску, що передавався на трубку, – за величиною тиску всередині трубки. За результатами експериментальних досліджень отримано залежності коефіцієнта бокового розпору солених порід від температури при різних величинах нормальних напружень. Встановлено, що з підвищенням температури від 70 °С і вище величина бокового зовнішнього тиску на трубку наближається до вертикальної складової тиску. Відповідно до результатів дослідження показано доцільність врахування термобаричних умов залягання техногенних відкладів при розрахунку обсадних колон на зовнішній надлишковий тиск.*

*Ключові слова:* зм'яття обсадних колон, лабораторна установка, температура, коефіцієнт бокового розпору.

*Проведен анализ промышленных данных по повреждениям обсадных колонн на месторождениях Бориславского и Долинского нефтепромышленных регионов. Установлено, что самыми существенными негативными факторами, которые влияют на сохранение целостности обсадных колонн, являются наличие в геологическом разрезе скважин интервалов залегания соленосных пород и неучет возможного действия горного давления при проектировании обсадных колонн в отмеченных отложениях. В соленосных горных породах при определенных условиях на колонну может передаваться горное давление. Для изучения термобарических условий передачи внешнего давления обсадной колонне со стороны соленосной породы были проведены экспериментальные исследования с кернам материалом пород воротищенской свиты, отобранным на разных глубинах Орив-Уличнянского месторождения. С этой целью была изготовлена специальная лабораторная установка, которая позволяет исследовать напряженное состояние и текучесть горных пород при действии пластовой температуры и горного давления. Так как прямое измерение радиального давления, которое передавалось на трубку, и температуры внутри камеры во время проведения экспериментов усложнено, тарирование установки проводилось по давлению и температуре. Это позволило определять температуру внутри камеры по величине напряжения, подаваемого на нагревательный элемент, а величину радиального давления, которое передавалось на трубку, – по величине давления внутри трубки. По результатам экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента бокового распора соленосных пород от температуры при разных величинах нормальных напряжений. Установлено, что при повышении температуры от 70 °С и выше величина бокового внешнего давления на трубку приближается к вертикальной составляющей давления. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований рекомендованы термобарические условия учета горного давления при расчете обсадных колонн на внешнее избыточное давление в интервалах залегания соленосных пород месторождений Прикарпатья.*

*Ключевые слова:* смятие обсадных колонн; лабораторная установка; температура; коэффициент бокового распора.

The analysis of field data from casing failure on the fields of the Borislav and Dolinsky oilfield regions has been carried out. It has been found that the most significant negative factors that have a bearing on the preservation of the integrity of the casing strings are the presence of saliniferous rock intervals in the borehole log and not taking into account the possible impact of rock pressure when designing casing strings in these rocks. In saliniferous rocks, under certain conditions, rock pressure can be transferred to the column. To study the thermobaric conditions of the external pressure transfer to the casing from the saliniferous rock, experimental tests have been carried out on the core materials of the rocks of the Vorotyshchensk floor, sampled at different depths of the Oriv-Ulychniansk field. For this purpose, a special laboratory installation was made, which allows to study the stress conditions and rock flowage on exposure to formation temperature and rock pressure. Because it was difficult to directly measure the radial pressure transmitted to the pipe and the temperature inside the chamber during the experiments, the installation was calibrated by pressure and temperature. This made it possible to determine the temperature inside the chamber by the value of the voltage supplied to the heating element, and the value of the radial pressure supplied to the pipe - by the value of the pressure inside the pipe. Based on the results of experimental research, the dependences of the lateral earth pressure coefficient of saliniferous rocks on temperature were obtained at various values of normal stresses. It was found that when the temperature rises to 70 ° C and higher, the value of the lateral external pressure on the pipe approaches the vertical component of the pressure. According to the results of the experimental research, the temperature and pressure conditions for accounting for rock pressure were recommended when calculating casing strings for external overpressure in the intervals of occurrence of saliniferous rocks of the Carpathian fields.

Keywords: casing collapse; laboratory installation; temperature, lateral earth pressure coefficient.

### Вступ

Зім'яття обсадних колон має місце як в процесі буріння, так і при експлуатації нафтових і газових свердловин на більшості родовищ України. Ця проблема особливо актуальна для свердловин, в розрізі яких зустрічаються плинні соленосні породи [1]. З метою розроблення заходів заходів з підвищення довговічності обсадних колон важливим є вивчення механізму проявлення плинності порід, визначення величин зовнішніх тисків, що діють на обсадні труби в цих породах.

**Метою роботи** є вивчення термобаричних умов, при яких на обсадну колону соленосними породами передається гірський тиск.

### Аналіз промислових даних

На Орив-Уличнянському нафтовому родовищі Бориславського нафтопромислового району із 40 пробурених свердловин 12 ліквідовано через зім'яття обсадних колон. При цьому більшість випадків зім'яття обсадних колон мали місце в період експлуатації свердловин. Лише в свердловині 58-Іваники була деформована 324-мм обсадна колона на глибині 2410 м під час буріння, а через п'ять років експлуатації пройшло повторне зім'яття вже 168-мм обсадної колони на глибині 2412 м.

У більшості свердловин випадки зім'яття були виявлені після тривалої експлуатації (12-15 років), хоча є ряд свердловин, де пошкодження колон були виявлені через 3-7 років після введення їх в експлуатацію (99-Орив, 58-Іваники).

Інформативним можна вважати метод прогнозування зон деформації обсадних колон за

даними кривизни свердловини. Інклінометричними замірами по ряду свердловин (17-Орив, 21-Орив, 99-Орив, 158-Орив, 17-Улично) зафіксовано, що зім'яття обсадних колон мало місце в інтервалах перегинів ствола свердловини.

Вивчення і аналіз геологічної будови Орив-Уличнянського родовища не дозволяє виявити закономірності зім'яття обсадних колон залежно від будови родовища, хоча свердловини із зім'ятими колонами знаходяться в двох аномальних за геодинамічними характеристиками зонах.

Перша з таких зон невпевнено картується аерокосмічною зйомкою у вигляді лініаменту, який навскіс перетинає структури насуву першого і другого ярусів, не знаходячи відображення в їх будові за даними буріння і сейсміки. Якщо вважати ширину зони 1 км, то в межах структури першого ярусу розміщується 31 свердловина, 9 (близько 30%) з яких зім'яті колони. За даними геофізичних досліджень виявлено, що зім'яття обсадних колон проходило в глинисто-соленосних відкладах воротищенської світи (1520-2600 м), причому здебільшого в прошарках чистої солі (галіту) або дуже засолених глин, які здатні до пластичної плинності у певних термобаричних умовах.

Інша аномально тектонічна напружена зона знаходиться в головній частині насуву Бориславсько-Покутської зони. Тут між фронтальними лініями першого та другого ярусів, тобто в зоні найбільшої геостатичної напруженості, знаходяться свердловини: 2÷17 Улично, 39, 96 - Улично. Слід також зазначити, що і в даному випадку системи в розповсюдженні порушень обсадних колон в свердловинах, як і в розміщенні самих свердловин з зім'ятими колонами на площі, не спостерігається.

Таблиця 1 – Дані про зім'яття обсадних колон на Орів-Уличнянському родовищі

Номер свердловини	Фактична глибина, м	Діаметр колони, мм / глибина спуску колони, м		Глибина зім'яття, м / відклади
		проміжна	експлуатаційна	
2-Улично	3253	193/2842	127/3116	2200/воротищенські
17-Улично	3477	193/2826	127/3243	528/поляницькі
39-Улично	3395	193/2723	127/3388	1725/воротищенські
96-Улично	3363	193/2652	168/3282	2170/воротищенські
158-Орів	3301	219/2785	146/3267	1927/воротищенські
21-Орів	3288	193/2229	127/3185	2300/воротищенські
99-Орів	3367	245/1301	146/3353	2496/воротищенські
17-Орів	3405	193/2603	127/3392	2875/поляницькі
95-Улично	2985	219/2485	146/2982	1320/воротищенські
175-Орів	3605	245/2817	146/3605	2319/воротищенські
25-Орів	3631	193/2750	127/3627	3567/менілітові
58-Іваники	3737	324/3522	168/3560	2412/воротищенські

Таблиця 2 – Дані про зім'яття обсадних колон по родовищах Долинського регіону

Номер свердловини	Фактична глибина, м	Діаметр колони, мм / глибина спуску колони, м		Глибина зім'яття, м / відклади
		проміжна	експлуатаційна	
117-ПД	3141	193/2189	127/3138	1031/воротищенські
822-Долина	3002	245/682	146/3002	1704/поляницькі
64-Спас	2320	193/1551	127/2317	838/воротищенські
105-Долина	2308	193/1425	127/2308	1672/поляницькі
310-Долина	2888	219/2299	146/2880	1193/воротищенські
265-Долина	2653	193/1812	127/2653	440/воротищенські

У цих двох зонах 12 свердловин ліквідовано через зім'яття обсадних колон в процесі експлуатації свердловин. Крім цього, сім свердловин ліквідовано з геологічних причин та сім свердловин – з інших технічних причин. Необхідно зауважити, що в аномальних зонах діють експлуатаційні свердловини і до сьогодні.

У таблиці 1 дана коротка характеристика свердловин із зім'ятими обсадними колонами на Орів-Уличнянському родовищі.

Аналіз промислових даних по родовищах Долинського регіону (таблиця 2) також показав, що майже всі випадки зім'яття обсадних колон мали місце в інтервалах залягання плинних порід.

Багатофакторним аналізом з використанням теорії розпізнання образів встановлено, що найбільш вагомо на зім'яття обсадних колон на нафтових і газових родовищах Прикарпаття впливають наявність у розрізі свердловин інтервалів залягання соленосних порід та неврахування дії гірського тиску при проектуванні обсадних колон у таких гірських породах [2]. У вказаних інтервалах за певних термобаричних умов на обсадну колону може передаватися гірський тиск. Для вивчення процесу передачі ти-

ску обсадній колоні з боку соленосної породи необхідно провести експериментальні дослідження.

#### Висвітлення основного матеріалу

Для проведення експериментів була виготовлена спеціальна лабораторна установка, яка дозволяє проводити дослідження напруженого стану і плинності гірських порід при дії гірського тиску та пластової температури (рис. 1).

З цією метою використовували керновий матеріал порід воротищенської світи з високим вмістом галіту, відібраний з різних глибин Орів-Уличнянського родовища (табл. 3).

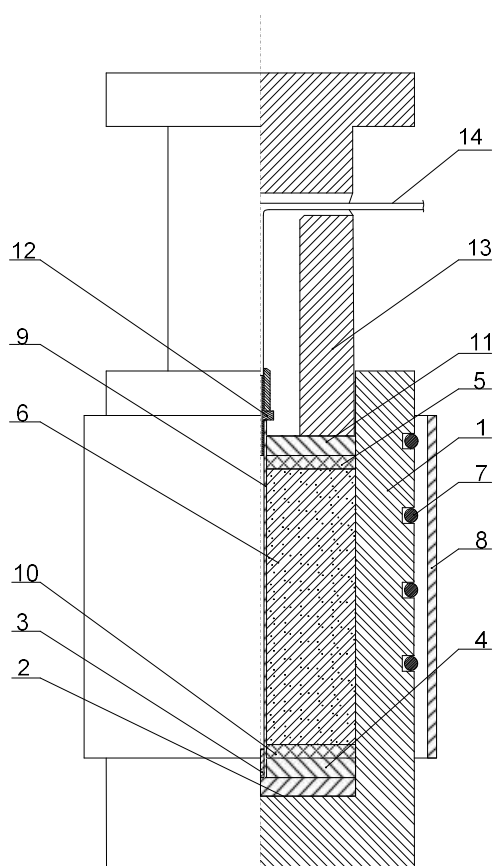
Розміри зразків вибирались відповідно до умов існуючих методик, тобто

$$D \geq 5 \cdot d; \quad h / \sqrt{S} \geq 0,7, \quad (1)$$

де  $D$  - зовнішній діаметр зразка, м;  
 $d$  - діаметр модельної свердловини, м;  
 $h$  - висота зразка, м;

$S$  - площа поперечного перерізу зразка, м<sup>2</sup>.

Зовнішній діаметр зразка визначався діаметром керна і становив 80 мм, тому діаметр модельної свердловини дорівнював 16 мм, а висота зразка – 100 мм.



1 – товстостінний циліндр; 2 – дно циліндра;  
3 – заглушка; 4, 11 – сталеві шайби;  
5, 10 – гумові прокладки; 6 – зразок гірської  
породи; 7 – нагрівальний елемент; 8 – кожух;  
9 – сталева трубка; 12 – перехідник;  
13 – плунжер; 14 – підвідна трубка

**Рисунок 1 – Схема камери високого тиску  
для дослідження напруженого стану  
гірських порід**

Зразок гірської породи 6 вміщували в камеру високого тиску, яка являє собою товстостінний циліндр з дном і нагрівальним елементом 7. Нагрівальний елемент ззовні закритий кожухом 8, а ущільнення зразка гірської породи проводили за допомогою сталевих шайб 4, 11 і гумових прокладок 5, 10. Всередині зразка просвердлювали отвір діаметром 16 мм, в який вставляли сталеву трубку 9 такого ж діаметру з

товщиною стінки 2,2 мм. Трубка виконувала роль датчика для вимірювання зовнішнього тиску, що передавався на неї зразком гірської породи. В нижній кінець трубки вгвинчували заглушку 3, а у верхній – перехідник 12. Для герметизації з'єднань кінці трубки зварювали. Трубку заповнювали трансформаторним маслом і попередньо створювали в ній тиск з допомогою преса через підвідну трубку 14 та перехідник 12. Таким чином, зовнішній радіальний тиск, який передавався на трубку зразком гірської породи, спричиняв зміну тиску всередині трубки, що реєструвалося манометром.

Осьове стискуюче навантаження створювали за допомогою плунжера 4 та гідравлічного домкрата 1, розміщених відповідно над та під камерою високого тиску (рис. 2).

Для регулювання температури в камері 3 до нагрівального елемента підводилась різна за величиною напруга за допомогою автотрансформатора 2.

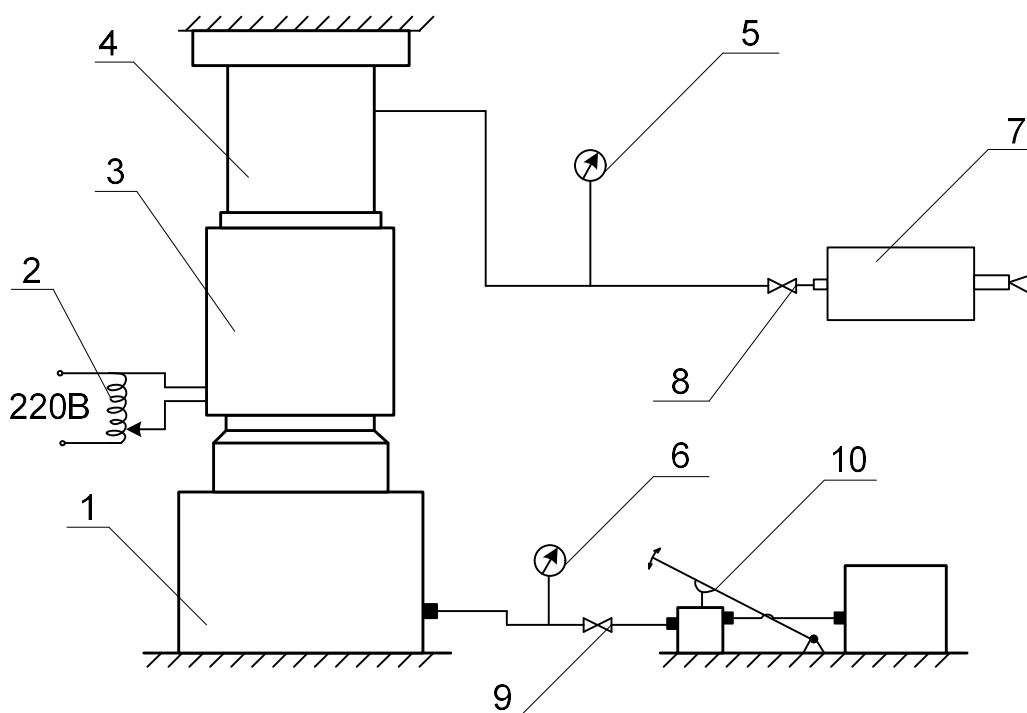
У зв'язку з тим, що прямий замір температури всередині камери під час проведення експериментів ускладнений, було проведено її непрямий замір за величиною напруги. Тарування вимірної схеми за температурою полягало в наступному. На нагрівальний елемент подавали напругу певної величини протягом 3÷4 годин до повної стабілізації температури всередині камери. Температуру в приміщенні лабораторії під час проведення експериментальних досліджень підтримували постійною в межах  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Результати тарування установки зведено в таблиці 4.

Для встановлення характеру зміни внутрішнього тиску в трубці при зміні зовнішнього тиску, сталеву трубку випробовували без гірської породи в камері. З цією метою в камеру високого тиску замість зразка гірської породи поміщали віск, підігрітий до температури  $45^\circ\text{C}$ . За цієї температури віск переходить у пластичний стан і  $\sigma_x = \sigma_z$ . З допомогою гідравлічного домкрата і плунжера створювали осьове наван-

**Таблиця 3 – Склад кернового матеріалу порід воротищенської світи свердловин  
Орив-Уличнянського родовища**

Номер свердловини	Інтервал відбору, м	Склад керна, %					
		галіт	глина, аргіліт	гіпс	доломіт	пірит	інші
191-Орив	2201-2205	75,2	20,8	0,9	-	0,6	2,5
192-Орив	2748-2752	98,8	1,1	-	-	-	0,1
187-Орив	2685-2689	85,1	13,0	-	1,5	-	0,4
190-Орив	1803-1808	65,3	29,5	1,9	2,2	-	1,1



1 – гідравлічний домкрат; 2 – автотрансформатор; 3 – камера високого тиску; 4 – плунжер; 5,6 – манометри; 7 – прес; 8,9 – вентиля; 10 – насосна установка

Рисунок 2 – Схема обв’язки установки

Таблиця 4 – Результати тарування установки

Напруга, В	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Температура, °С	40	46	53	60	67	75	85	100	120

таження, в результаті чого на трубку передався радіальний тиск  $\sigma_r$ . Зміну тиску всередині трубки реєстрували вірцевим манометром. У такий спосіб було отримано графічну залежність зміни тиску всередині трубки від величини зовнішнього тиску (рис. 3).

Для дослідження зразків соленосних порід застосовували таку методику. Зразок гірської породи поміщали в камеру високого тиску. Трубку заповнювали трансформаторним мастилом і за допомогою преса створювали в ній тиск 3,0МПа. Перед проведенням експериментальних досліджень зразки породи просушували в сушильній шафі за температури 50°С протягом 48 годин.

За допомогою гідравлічного преса в камері високого тиску створювали осьове навантаження, яке моделювало гірський тиск для заданих глибин. Осьове навантаження на зразок гірської породи збільшували плавно до заданої величини, контроль якої здійснювався за зміною величини внутрішнього тиску. Зразок гірської породи витримували в напруженому стані не менше 72 годин або до повної передачі гірського тиску на трубку.

### Результати

Результати експериментальних досліджень обробляли за методами математичної статистики. Похибка результатів знаходилась у межах 5%. За результатами експериментальних досліджень отримана залежність коефіцієнта бокового розпору соленосних порід  $K$  від температури  $t$  при різних величинах нормальних напружень  $\sigma_z$ . На рисунку 4 наведено залежність  $K = f(t)$  при  $\sigma_z = 70$ МПа, з якої видно, що температура суттєво впливає на плинність солей.

За температури понад 70°С величина бокового зовнішнього тиску на трубку наближається до вертикальної складової тиску. За температури 80°С і вище  $\sigma_r = \sigma_z$ , тобто коефіцієнт бокового розпору соленосних порід (галіт) рівний одиниці. Отже, в інтервалах залягання соленосних порід за температур понад 70°С на обсадні труби повністю передається гірський тиск.

Температура біляствольного масиву гірських порід залежить від його природного температурного поля та характеру технологічних операцій, які виконуються в процесі буріння та експлуатації свердловини. Так, під час руху флюїду до устя свердловини через насосно-

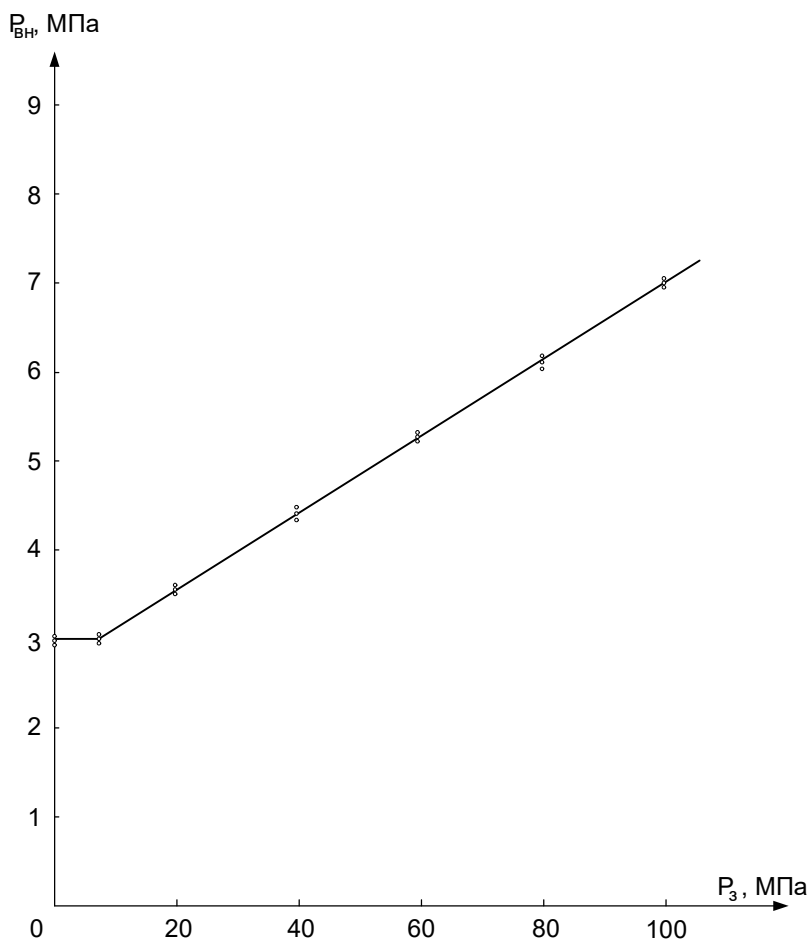


Рисунок 3 – Залежність тиску всередині трубки від зовнішнього тиску

компресорні труби в результаті теплообміну з гірськими породами, які охоплюють обсадну колону, його температура знижується. При цьому температура обсадної колони і гірських порід навколо свердловини підвищується і стає більшою за природну температуру масиву. Через деякий час експлуатації свердловини практично встановлюється постійний потік теплової енергії. Проведені теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження [3] показали, що значення діаметра зони порушення термічного режиму можуть досягати 10÷20м і більше. Однією з причин підвищення природної температури порід є також закачування теплоносіїв у пласт у нагнітальних свердловинах.

### Висновки

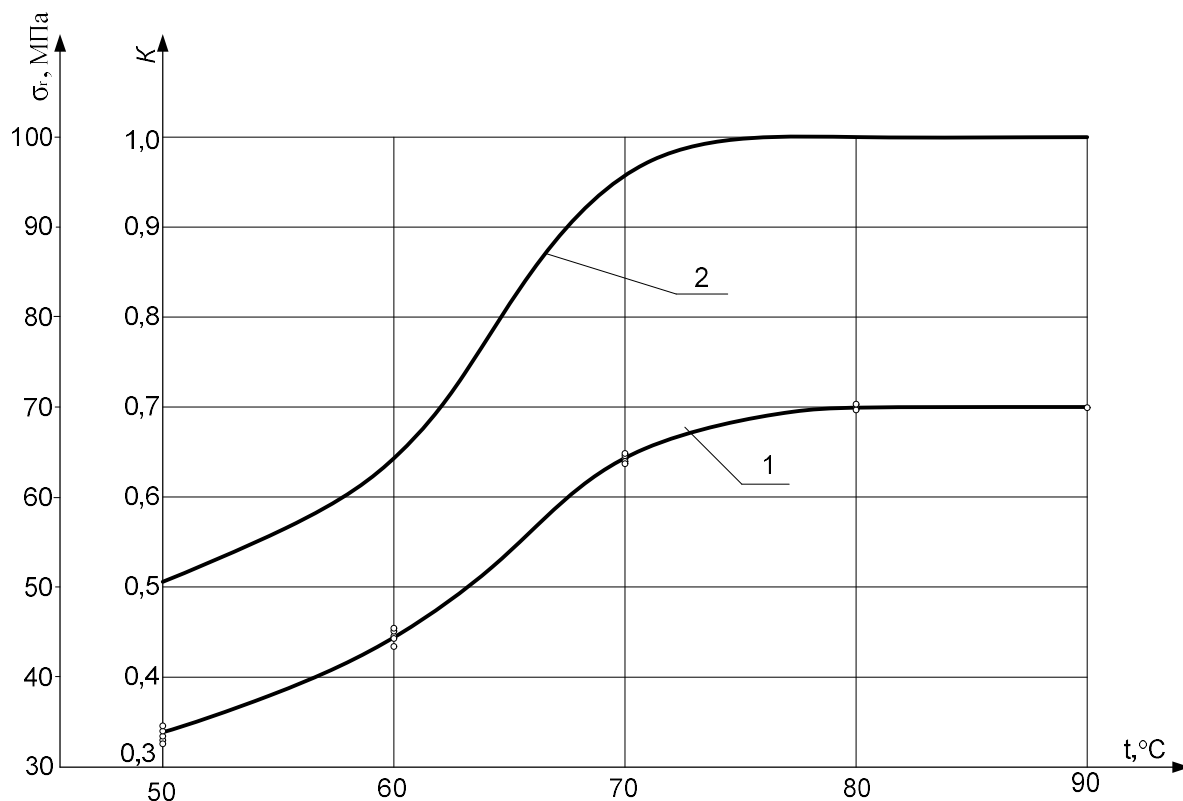
Аналізом промислового даних по Орів-Уличнянському нафтовому родовищу Бориславського нафтопромислового району та родовищах Долинського регіону не виявлено закономірності змін діаметра обсадних колон в залежності від їх геологічної будови. Однак майже всі випадки змін діаметра обсадних колон мали місце в інтервалах залягання соленосних порід.

Для дослідження напруженого стану гірських порід під впливом гірського тиску і пластової температури було виготовлено лабораторну установку. Встановлено, що при підвищенні температури понад 70°C коефіцієнт бокового розпору соленосних порід рівний одиниці.

Розрахунок обсадних колон на зовнішній надлишковий тиск в інтервалах залягання соленосних порід на родовищах Прикарпаття необхідно проводити з врахуванням гірського тиску:

- для свердловин різного призначення, якщо природна температура порід перевищує 70°C;

- для нагнітальних і видобувних експлуатаційних свердловин, в яких передбачається проведення технологічних операцій, що можуть спричинити підвищення температури біляствольного масиву порід понад 70°C (наприклад, при закачуванні теплоносіїв у пласт в нагнітальних свердловинах, при транспортуванні флюїду з високою температурою в видобувних свердловинах).



1 – радіальні напруження ( $\sigma_r$ ); 2 – коефіцієнт бокового розпору ( $K = \sigma_r / \sigma_z$ )

**Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта бокового розпору соленосних порід (галіт) від температури ( $\sigma_z = 70$ МПа)**

*Література*

*References*

1. Коццулич Я.С., Сенюшкович М.В., Марцинків О.Б., Ковбасюк І.М. Підвищення надійності кріплення свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. № 1(42). С. 160-168.

2. Femiak V. Y., Kovbasiuk I. M., Martsynkiv O. B., Femiak Y. M., Vytvytskyy I. I. Evaluation of the influence of geological-technical factors on the durability of casing columns in oil and gas wells. Paper presented at the Monitoring 2019 Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

3. Череменский Г.А. О зоне нарушения теплового состояния горных пород бурением скважины. *Изв. АН СССР. Геофиз.* 1960. №10. С. 1507-1509.

1. Kotskulych Ya.S., Seniushkovych M.V., Martsynkiv O.B., Kovbasiuk I.M. Pidvyshchennia nadiinosti kriplennia sverdlovyn. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2012. No 1(42). P.160-168. [in Ukrainian]

2. Femiak V. Y., Kovbasiuk I. M., Martsynkiv O. B., Femiak, Y. M., Vytvytskyy, I. I. Evaluation of the influence of geological-technical factors on the durability of casing columns in oil and gas wells. Paper presented at the Monitoring 2019 Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

3. Cheremenskiy G.A. O zone narusheniya teplovogo sostoyaniya gorniyh porod bureniem skvazhiniy. *Izv. AN SSSR. Geofiz.* 1960. No 10. P. 1507-1509. [in Russian]