

РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПРОЦЕСОМ ПОТУЖНОГО ГІДРОРОЗРИВУ ПЛАСТА

©Григораш В.В., 2004,

Центральна науково-дослідна лабораторія ВАТ "Укрнафта" (м. Івано-Франківськ)

Розглянуто проблему контролю за процесом потужного гідравлічного розриву пласта (ПГРП). Запропоновано комп'ютеризовану систему контролю та інтерпретації параметрів ПГРП в реальному масштабі часу „Frloss”

Проблема керування режимами потужного гідравлічного розриву пласта (ПГРП) та інтерпретації перебігу цього процесу в часі є однією з ключових для забезпечення його високої ефективності. Після придбання ВАТ "Укрнафта" в 1996 р. комплексу обладнання для ПГРП фірми "Stewart & Stevenson" виникла можливість запису параметрів процесу ПГРП в станції управління ПГРП. Під час кожного гідророзриву комп'ютерами станції управління ПГРП через кожні три секунди записуються: витрата рідини, тиск на усті, сумарний запомпований об'єм рідини, густина рідини.

Але проблема контролю та інтерпретації перебігу процесу ПГРП в часі під час його проведення не була до кінця вирішеною і залишається однією з ключових для забезпечення високої ефективності процесу ПГРП.

У світовій практиці ПГРП для контролю за розкриттям і розвитком тріщини застосовується теорія К.Нольта [1], згідно з якою розвиток тріщини можна контролювати, використовуючи інтенсивність кривої зміни чистого тиску розриву $P_{\text{чст}}$ під час проведення ПГРП, що визначається значенням тангенса кута нахилу кривої $\log P_{\text{чст}}$ до осі $\log t$ (рис.1), а саме:

- відрізок 1 відповідає розвитку тріщини в довжину при обмеженій її висоті;
- відрізок 2 відповідає незначному росту тріщини по висоті, або значній фільтрації рідини в пласт;
- відрізок 3 характеризує повільний ріст тріщини у довжину з одночасним її розширенням. Можливе дозаповнення тріщини закріплювачем;
- відрізок 4 характеризує швидкий ріст чистого тиску розриву і вказує на зупинку розвитку тріщини, переважно внаслідок випадання в тріщині закріплювача (піску, пропанту);
- відрізок 5 свідчить про швидкий ріст висоти тріщини, або розкриття тріщини на контактах продуктивного пласта (в його підшві, або покрівлі). Тріщина легко заповнюється закріплювачем.

Чистий тиск розриву визначають так :

$$P_{\text{чст}} = P_{\text{виб}} - P_{\text{зкр}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{виб}}$ – тиск на вибої; $P_{\text{зкр}}$ – тиск закриття тріщини, який визначається за даними гідродинамічних досліджень свердловини.

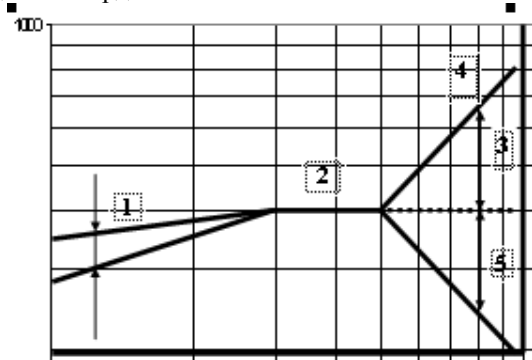


Рис. 1. Діаграма типової зміни величини чистого тиску в часі при проведенні ПГРП

Оскільки прямих вимірів для контролю тиску на вибої під час проведення ПГРП в наших умовах не проводиться, тому для забезпечення використання теорії К.Нольта поставлено завдання розробити методичні підходи обробки комп'ютерних даних, одержаних з датчиків на поверхні.

Вибірний тиск на рівні насосно-компресорних труб (НКТ) $P_{\text{виб.нкт}}$ можна визначити так (рис.2) :

$$P_{\text{виб.нкт}} = P_{\text{уст}} + P_{\text{гст}} - P_{\text{втр}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{уст}}$ – тиск на усті свердловини; $P_{\text{гст}}$ – гідростатичний тиск стовпа рідини в НКТ, який дорівнює $\rho \times g \times H$ (H – висота стовпа рідини в НКТ (м); ρ – густина рідини (кг/м³); g – прискорення вільного падіння (м/с²)); $P_{\text{втр}}$ – тиск гідравлічних втрат на тертя в НКТ.

В даний час вже розроблені основні методичні підходи визначення гідравлічних втрат тиску на тертя рідини в трубах [2,3] та розроблена методика розрахунку градієнту втрат тиску на тертя за відомими реологічними властивостями рідин [4,5].

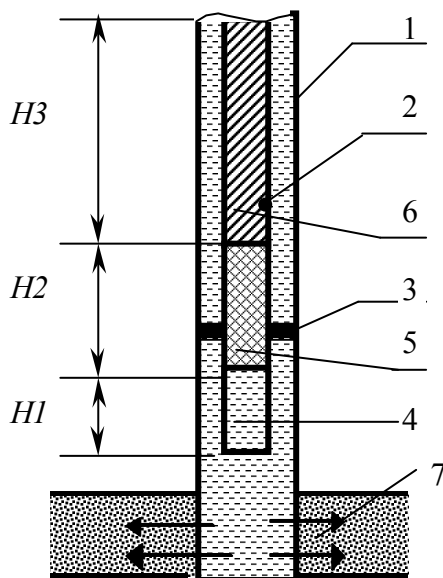
Вказані методики опрацьовані в результаті попередньо проведених ПГРП, розроблено основні алгоритми виконання розрахунків і поставлено завдання розробки комп'ютеризованої системи для контролю за процесом ПГРП.

Розглянемо типову схему помпування техноло-

гічних рідин при ПГРП (рис. 2).

Початковим етапом є рух рідини, що знаходиться у свердловині перед початком процесу ПГРП. Це, як правило, рідина глушіння (ньютонівська рідина). Далі помпують високов'язку рідину розриву (так звану подушку), за нею рідину із закріплювачем тріщин (пульпу), яку протискають рідиною протискування. Кожна з цих технологічних рідин має свої реологічні властивості.

Основною складністю під час контролю за вибійним тиском є розрахунок значень $P_{сст.}$ та $P_{втр.}$, із-за необхідності урахування руху різних типів рідин (тобто послідовне безперервне помпування ньютонівських та неньютонівських рідин з різними реологічними характеристиками), що вимагає постійного відслідковування динаміки руху цих рідин в часі.



1 - обсадна колона ; 2 - НКТ; 3 - накер; 4 – рідина глушіння; 5 – гель 1; 6 - гель 2; 7-продуктивний пласт; H_1 - висота стовпа рідинини глушіння; H_2 - висота стовпа геля1; H_3 - висота стовпа геля 2

Рис. 2. Вибій свердловини під час ПГРП

Особливістю даної моделі є розбиття процесу в цілому на окремі етапи та паралельний рахунок на кожному з цих етапів. Такий підхід дозволить значно зменшити похибки, пов'язані з усередненням

даних.

Вхідними даними для розрахунку є: $H_{нкт}$ – довжина НКТ(м); d -діаметр НКТ(м); K, n – реологічні характеристики кожної з рідин. Поточними даними є: V -сумарний об'єм (m^3), Q -миттєва витрата ($m^3/хв$), ρ -густина ($кг/м^3$), $P_{уст}$ - тиск на усті (МПа). Для виконання розрахунку за даною методикою вказані дані повинні бути представленими у цифровому форматі.

Для контролю за динамікою руху рідин в кожний момент часу необхідно визначати висоту стовпа відповідної рідини на кожному із етапів. Приклад динаміки помпування різних рідин під час проведення ПГРП зображено на рис.3.

Після початку нового етапу (помпування нової рідини) висота стовпа цієї рідини в НКТ в часі буде зростати, а висота даної рідини на попередньому етапі буде зменшуватись. Ріст висоти стовпа рідини в поточний момент часу H_t (м) можна визначити так:

$$H_t = \frac{(V_t - V_{t-1})}{\pi \times R^2} + H_{t-1}, \text{ де } V_t - \text{сумарний об'єм}$$

момент часу t , V_{t-1} – попереднє значення сумарного об'єму (в момент часу $t-1$), R - внутрішній радіус колони НКТ, H_{t-1} - попереднє значення висоти стовпа рідини.

Аналогічно визначають зменшення висоти стовпа іншої рідини в момент часу t

$$H_t = H_{t-1} - (V_t - V_{t-1}) / (\pi \times R^2) .$$

За такою методикою можна вести контроль за рухом відповідної рідини в НКТ.

На основі отриманих поточних значень висоти стовпів рідин на кожному із етапів програма буде діаграму руху рідин у свердловині в часі, виділивши кожен рідину іншим кольором. Таким чином, ми можемо візуально спостерігати за динамікою руху рідин в свердловині під час самого процесу ПГРП, що дозволяє спростити аналіз та коригування режимів процесу на етапах входження рідини розриву чи пульпи в пласт (коли можливе різке критичне підняття тиску), уникнути небажаного залишку високої пробки піску в НКТ, викликаного помилковими розрахунками висоти стовпів різних рідин.

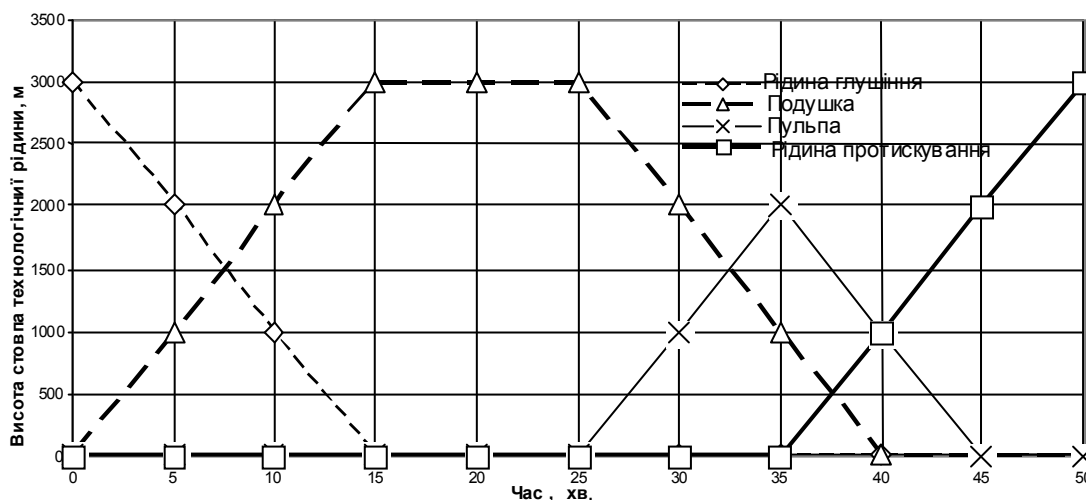


Рис.3. Приклад динаміки руху технологічних рідин під час проведення ПГРП

Далі визначають тиск гідравлічних втрат на тертя, гідростатичний тиск та тиск вибійний на кожному із етапів згідно вищевказаних формул (1) і (2). При переході від одного етапу до іншого кожний поточний розрахований параметр використовується як вхідний для наступного етапу.

В результаті в кожний момент часу отримують розрахункові значення на всіх етапах, а сумуючи їх, знаходять загальні значення гідравлічних втрат та гідростатичного тиску:

$$P_{втр.заг} = P_{1втр} + P_{2втр} + \dots + P_{nвтр}, \quad (3)$$

де $P_{втр.заг}$ - загальне значення втрати тиску на тертя по всіх рідинах (етапах) в даний момент часу; $P_{1втр}$, $P_{2втр}$ - обрховані значення втрат на кожному із етапів; n - кількість етапів (процедур). Аналогічно

$$P_{гст.заг} = \sum P_{гст}$$

Визначивши $P_{втр.заг}$ та $P_{гст.заг}$, таким чином знаходять значення вибійного тиску та чистого тиску. Виконавши ці рахунки в кожний момент часу процесу ПГРП та побудувавши графіки отримують можливість контролю за вибійним тиском та чистим тиском. Таким чином, використовуючи теорію Нольте та розроблену нами методику, стало можливим під час проведення процесу ПГРП передбачати розвиток тріщини у пласті.

З досвіду проведення ПГРП відомо, що окрім вищевказаних параметрів контролю у зв'язку з екстремальними режимами роботи дуже важливим, що-

до передбачення аварійних ситуацій процесу, пов'язаних з пропуском пакера та перевищення допустимого тиску на труби НКТ, є поточний контроль за перепадом тиску на пакері.

Перепад тиску $\Delta P_{пак}$ можна визначити так: $\Delta P_{пак} = P_{виб} - (P_{гст.затр} + P_{доод})$, де $P_{гст.затр}$ - гідростатичний тиск у затрубному просторі, $P_{доод}$ - додатково створений тиск в затрубний простір.

В результаті побудови графіка $\Delta P_{пак}$ в кожний момент часу проведення ПГРП отримують можливість його контролю, а отже і можливість коригування технології проведення ПГРП з метою неперевищення критичних попередньо розрахованих значень тиску.

За вищевикладеною методикою розроблена програма „Frloss” [5], яка дозволяє в реальному масштабі часу вести контроль за основними параметрами процесу у вигляді графіків або діаграм.

Для прикладу з метою контролю за процесом ПГРП згідно вищевикладеного розглянемо процес проведення ПГРП, який відбувся у свердловині №430-Битків НГВУ ”Надвірнанафтогаз”.

Перед початком процесу на НКТ спушено пакер до глибини 1798м. За попередніми даними визначено, що тиск закриття тріщини $P_{зкр} = 36$ МПа. Процес розпочали з нагнітання в НКТ полімерно-емульсійного розчину без піску при витраті 2,6-2,7 м³/хв (рис.4).

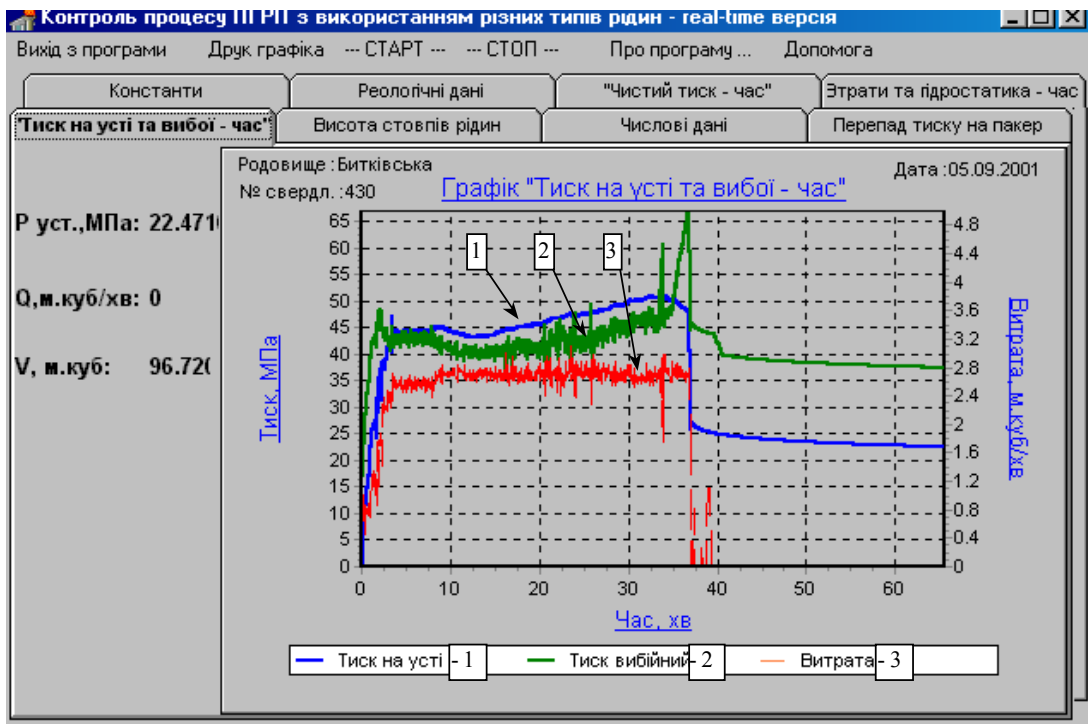


Рис.4. Контроль витрати, устьового та вибійного тисків за програмою „ Frloss ”

Протягом нагнітання перших 30 м^3 розчину тиск був на рівні 43-45 МПа. Гідростатичний тиск при цьому становив 18,5 МПа, а тиск гідравлічних втрат - 19-21 МПа (рис.5). На 34 м^3 (15-та хвилинка) приступили до подачі закріплювача (піску) в розчин з концентрацією 130-150 $\text{кг}/\text{м}^3$. Із рис.5 видно як на 15-тій хвилині у зв'язку із збільшенням питомої ваги розчину в результаті подачі закріплювача підвищився гідростатичний тиск. Оскільки присутність у технологічній рідині закріплювача веде до збільшення тертя рідини, гідравлічні втрати при цьому також збільшились (рис.5) і становили 25-27 МПа. Концентрацію піску поступово підвищували з 150 до 350-380 $\text{кг}/\text{м}^3$. Тиск на усті при цьому поступово зростає із 44 МПа до 50,6 МПа.

У зв'язку з високими гідравлічними втратами тиску на тертя гелю в НКТ вибійний тиск (рис.4) під час даного процесу ПГРП був нижчим за устьовий, що дозволило прийняти оптимальні рішення при проведенні процесу ПГРП, чого раніше не можна було зробити.

Контролюючи перепад тиску на пакері за програмою „ Frloss ” (рис.6), вирішили з метою зме-

нення перепаду тиску на пакер (для уникнення його пропуску, що могло би призвести до аварійної ситуації) в затрубний простір здійснювати періодичну підкачку води під тиском 6 МПа на початку процесу і 9 МПа в кінці процесу.

Як видно з кривої чистого тиску (рис.7), на початковому етапі процесу ПГРП відмічено ріст чистого тиску, після чого відбулось його падіння відповідно до відрізка 5 (рис.1) за теорією Нольте, що свідчить про швидкий ріст висоти тріщини, тобто розкриття тріщини в продуктивному пласті (в його підшві, або покрівлі). При цьому тріщина легко заповнювалася закріплювачем.

Далі (від 2-ої до 8-ої хвилини) крива чистого тиску вела себе згідно відрізка 1 (рис.1), що відповідало повільному росту $P_{\text{чст}}$, тобто розвитку тріщини в довжину при обмеженій її висоті. Ця оцінка дозволила перейти на режим більшої витрати рідини для кращого відкриття тріщини. Протягом 9-11 хвилин згідно з кривою відбувався ріст висоти тріщини, що дозволило зробити висновок про нормальний розвиток тріщин та приступити до подачі закріплювача.

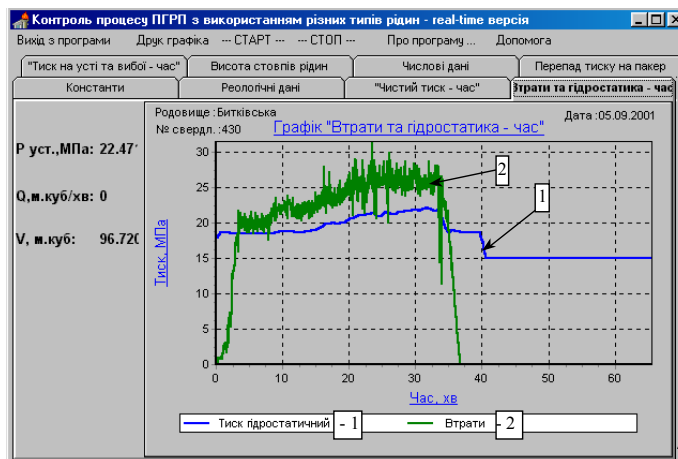


Рис.5. Контроль гідравлічних втрат та гідростатичного тиску за програмою „Frloss”

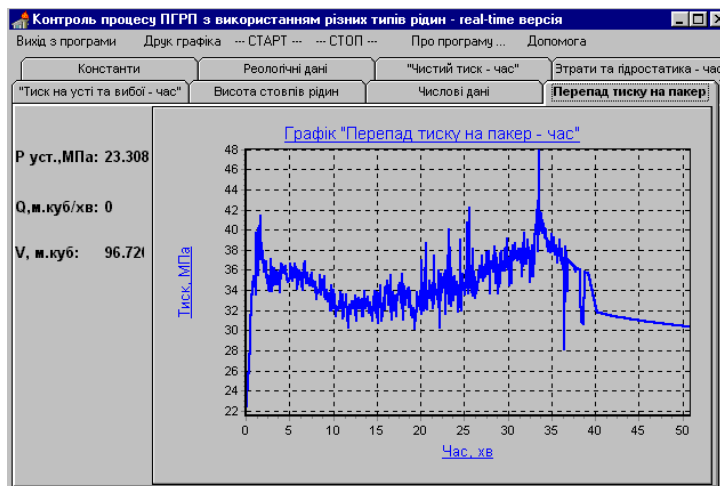


Рис.6. Контроль перепаду тиску на пакері за програмою „Frloss”

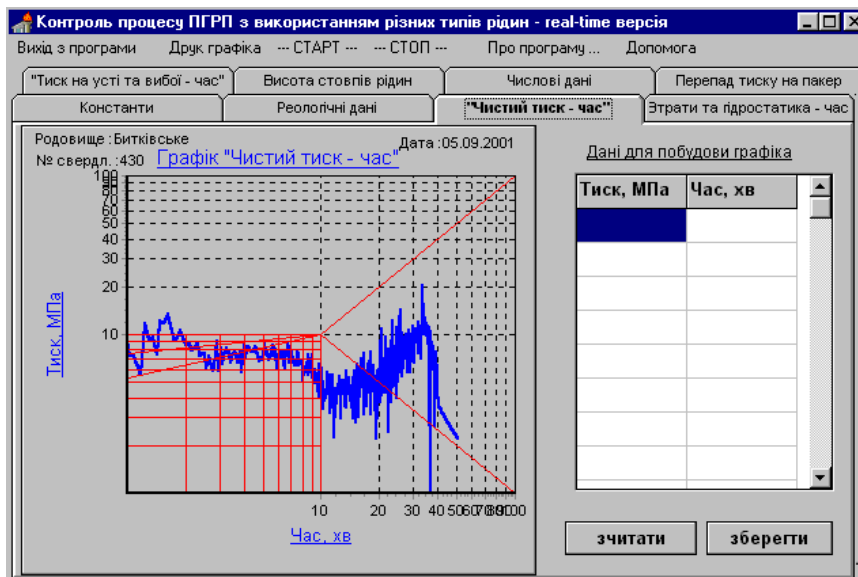


Рис.7. Контроль чистого тиску в паровесі ПГРП за програмою „Frloss”

На 20-ій хвилині закріплювач почав входити в пласт, що супроводжувалось підняттям чистого тиску згідно відрізком 4 (рис.1) і що свідчить про швидкий ріст чистого тиску розриву і про зупинку розвитку тріщини внаслідок випадання в тріщині закріплювача (піску, пропанту). Тут перекрився переріз вертикальної тріщини на деякій віддалі від устя, або закріплювач випадав в кінці тріщини і вона щільно заповнилася пропантом.

Після нагнітання 53 м³ на основі аналізу розвитку тріщини було прийнято рішення припинити подачу піску і на 88 м³ протиснули його в пласт полімерно-емульсійним розчином в об'єомом 8,2 м³. При цьому тиск на усті знизився до 48,2 МПа. Уточнення параметрів контролю за процесом ПГРП здійснювали за числовими даними, опрацьованими програмою „Frloss” (рис.8).

Сум.об'єм	Витр	Гус	В'язк	Вис	Висо	Гідрост. т	Втрати	Тиск на у	Тиск на в	Чисти	Час
1.92	1.28	990	0.0251	1160	637.3	18.568	2.305	24.001	40.264	4.264	0.62
2.76	1.55	990	0.0230	882.	915.7	18.915	4.480	30.812	45.247	9.247	1.30
3.93	2.34	990	0.0190	494.	1303.	18.725	12.222	38.606	45.109	9.109	1.97
5.47	2.28	990	0.0192	0.0	1798.	18.433	16.182	41.082	43.333	7.333	2.63
7.14	2.51	990	0.0184	0.0	1798.	18.433	18.834	44.032	43.631	7.631	3.28
8.87	2.54	990	0.0183	0.0	1798.	18.433	19.191	44.178	43.421	7.421	3.95
10.54	2.48	990	0.0185	0.0	1798.	18.433	18.480	44.069	44.023	8.023	4.62
12.27	2.50	990	0.0184	0.0	1798.	18.433	18.715	44.178	43.896	7.896	5.28
13.96	2.56	990	0.0182	0.0	1798.	18.433	19.430	44.251	43.254	7.254	5.97

Рис.8. Контроль числових параметрів процесу ПГРП за програмою „Frloss”

Після протискування піску в пласт записали криву зниження тиску протягом 30 хвилин (рис.4), подальший аналіз якої дозволив зробити висновки щодо подальшого освоєння свердловини. Після цього закрили свердловину для стабілізації тиску.

Розроблена система комп'ютерного контролю за параметрами процесу ПГРП „Frloss” знайшла застосування при проведенні ПГРП у всіх НГВУ ВАТ „Укрнафта”, на неї захищено авторські права [6].

Підсумовуючи вищевказане, можна зробити такі висновки:

- здійснено розробку методичних підходів до контролю і аналізу процесу ПГРП під час його проведення на свердловині;
- розроблено методику для визначення гідравлічних втрат тиску на тертя в трубах за реологічними характеристиками технологічних рідин, що pompуються під час ПГРП;
- розроблено комп'ютеризовану програму „Frloss” для контролю за основними параметрами процесу ПГРП під час його проведення;
- проведено апробацію, коригування та впро-

вадження програми „Frloss”.

1. Nolte K.G. and Smith M.B.: "Interpretation of Fracturing Pressures" Sep. 1981, 65 с. 2. "MFRAC-II" Hydraulic Fracturing Simulator USA Meyer & Associated, Inc. 1994, 88 с. 3. Качмар Ю.Д., Григораиш В.В. Кісіль І.С. Розробка методологічних підходів для контролю і аналізу процесу гідравлічного розриву пласта// Методи та прилади контролю якості. –2002, №8. - С. 94-96. 4. Звіт ЦНДЛ: "Удосконалення технологічної оснащеності для контролю за процесом ПГРП ." Договір №01/305, м.Івано-Франківськ, 2002р - 65 с. 5. Григораиш В.В., Кісіль І.С. Визначення гідравлічних втрат під час руху рідини в трубах у процесі потужного гідророзриву пласта// Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ – 2004 №1(10) - С. 75-78. 6. Свідоцтво про реєстрацію авторських прав № 6172 "Комп'ютерна програма Контроль за параметрами проведення потужного гідророзриву пласта " ("Frloss") – 2с.