

УДК 620.91

А. А. РЕДЬКО, канд. техн. наук

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка,

Донецкая обл.

В.С. БУГАЙ

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ЭРЛИФТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены результаты экспериментального исследования гидравлических режимов геотермальных циркуляционных систем теплоснабжения при эрлифтной эксплуатации.

Наведені результати експериментального дослідження гідравлічних режимів геотермальних циркуляційних систем теплопостачання при ерліфтній експлуатації.

Постановка проблемы. Наиболее эффективной технологией разработки геотермальных месторождений, получившей широкое распространение, является применение геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) путем бурения нескольких эксплуатационных и одной нагнетательной скважины. ГЦС обеспечивает циркуляцию жидкости через подземный коллектор и поддержание заданной проектной производительности системы.

Сложность эксплуатации ГЦС теплоснабжения заключается в том, что после первых годов интенсивного фонтанирования дебиты добычных скважин снижаются. Поэтому, для увеличения производительности скважин требуется поиск средств принудительного подъема геотермальной воды.

Оптимальный дебит добычных скважин с учетом капитальных и эксплуатационных затрат составляет около 300–400 м³/ч [1]. При насосной эксплуатации с использованием насосов отечественного производства дебит единичных скважин может быть обеспечен около 30–70 м³/ч, некоторые зарубежные образцы могут обеспечить дебит около 200–300 м³/ч. Достаточно высокая минерализация, а также температура геотермальных вод требуют применения устойчивых к коррозии, дорогостоящих материалов при производстве насосов и другого оборудования. Возможность накипобразования в конструкции насоса по причине высокой минерализации термальных вод может потребовать нескольких замен дорогостоящих насосов, что повысит себестоимость геотермальной тепловой энергии и отрицательно скажется на надежности системы.

Увеличить период фонтанирующего режима эксплуатации геотермальных скважин возможно путем подачи воздуха или газа в эксплуатируемую скважину, т.е. применив эрлифтную или газлифтную технологии подъема жидкости, которые отличаются от насосной технологи простотой конструкции и управления дебитом в зависимости от потребности в геотермальном теплоносителе.

По данным [1] на установке эрлифтного подъема воды с применением двухфазной пены (добавка 0,1 % сульфанола) наблюдалось резкое увеличение производительности подъема. Применение пены исключает нерациональные режимы движения водовоздушной смеси, как кольцевой (пленочный), а также обеспечивает защиту оборудования от коррозии.

Цель исследований – определить гидравлические характеристики ГЦС теплоснабжения при эрлифтной эксплуатации.

Методика исследований. Согласно методике, изложенной в [2, 3], истинное газосодержание в двухфазном потоке можно определить по формуле:

$$\varphi_{\Gamma} = 0,5 \cdot \left[\left(1 + \varphi_{\Gamma}^0 \frac{Q_{\Gamma} + Q_{\mathcal{J}}}{Q_{\Gamma}} \right) - \sqrt{\left(1 + \varphi_{\Gamma}^0 \frac{Q_{\Gamma} + Q_{\mathcal{J}}}{Q_{\Gamma}} \right)^2 - 4\varphi_{\Gamma}^0} \right], \quad (1)$$

где φ_{Γ}^0 – истинное объемное содержание газовой фазы в статических системах, определяемое по формулам в зависимости от соотношения Q_{Γ}/F :

$$\varphi_{\Gamma}^0 = 0,262 + 0,490 \frac{Q_{\Gamma}}{F} - 0,120 \left(\frac{Q_{\Gamma}}{F} \right)^2 \quad \text{при } 0 < \frac{Q_{\Gamma}}{F} \leq 2, \quad (2)$$

$$\varphi_{\Gamma}^0 = 0,262 + 0,490 \frac{Q_{\Gamma}}{F} - 0,120 \left(\frac{Q_{\Gamma}}{F} \right)^2 \quad \text{при } \frac{Q_{\Gamma}}{F} > 2; \quad (3)$$

Q_{Γ} – измеренный расход воздуха, м³/с;

$Q_{\mathcal{J}}$ – измеренный расход воды, м³/с;

F – площадь живого сечения трубы, м².

Истинное содержание жидкой фазы в исследованиях $\varphi_{\mathcal{J}}$ определялось по формуле:

$$\varphi_{\mathcal{J}} = 1 - \varphi_{\Gamma}. \quad (4)$$

Так как усредненные абсолютные скорости жидкой и газообразной фаз в нормальном сечении эрлифта различны, то относительная скорость между фазами будет равна

$$v_{\mathcal{S}} = v_{\Gamma} - v_{\mathcal{J}}. \quad (5)$$

Скорости газообразной и жидкой фазы равны соответственно:

$$v_{\Gamma} = \frac{4 \cdot Q_{\Gamma}}{\varphi_{\Gamma} \cdot \pi \cdot d_{\Pi}^2}, \quad (6)$$

$$v_{\mathcal{J}} = \frac{4 \cdot Q_{\mathcal{J}}}{\varphi_{\mathcal{J}} \cdot \pi \cdot d_{\Pi}^2}, \quad (7)$$

где d_{Π} – диаметр подъемной трубы, м.

Истинную плотность двухфазного потока можно определить по формуле:

$$\rho_{\text{см}} = \varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}}, \quad (8)$$

где ρ_{Γ} – плотность газообразной фазы, кг/м³;

$\rho_{\mathcal{J}}$ – плотность жидкой фазы, кг/м³.

Экспериментально потери давления в подъемной трубе эрлифта определялись по показаниям дифференциального манометра, м. вод. ст.:

$$\Delta h_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{рт}} \cdot \Delta h_{\text{рт}} - \rho_{\text{см}} \cdot \Delta h}{\rho_{\text{в}}}, \quad (9)$$

где Δh – разность отметок между точками отбора давления на подъемной трубе эрлифта, м.

$\Delta h_{\text{рт}}$ – высота ртутного столба по дифференциальному манометру, м;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³.

Для сопоставления теоретических и экспериментальных данных по измерению перепада давления воспользуемся физической моделью эрлифта, изложенной в [3]. Потери давления при вертикальном движении газожидкостной смеси для элементарного объема потока высотой dz определяются уравнением:

$$dp = dp_{cm} + dp_{mp} + dp_u, \quad (10)$$

где dp_{cm} – потери давления на преодоление газожидкостного столба (или статическая составляющая потерь давления);

dp_{mp} – потери давления на сопротивление трению;

dp_u – потери давления на преодоление сил инерции.

В уравнении (10)

$$dp_{cm} = (\varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}}) \cdot g \cdot dz, \quad (11)$$

$$dp_{mp} = \frac{\lambda_{cm}}{2 \cdot d_{\Pi}} \cdot (\varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot v_{\Gamma}^2 + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}} \cdot v_{\mathcal{J}}^2) \cdot dz, \quad (12)$$

$$dp_u = d(\varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot v_{\Gamma}^2 + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}} \cdot v_{\mathcal{J}}^2). \quad (13)$$

С учетом (11-13) дифференциальное уравнение (10) представлено в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} = & (\varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}}) \cdot g + \frac{8 \cdot \lambda_{cm}}{\pi^2 \cdot d_{\Pi}^5} \cdot \left(\rho_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\Gamma}^2}{\varphi_{\Gamma}} + \rho_{\mathcal{J}} \cdot \frac{Q_{\mathcal{J}}^2}{\varphi_{\mathcal{J}}} \right) + \\ & + \frac{d}{dz} \left(\rho_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\Gamma}^2}{\varphi_{\Gamma}} + \rho_{\mathcal{J}} \cdot \frac{Q_{\mathcal{J}}^2}{\varphi_{\mathcal{J}}} \right) \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot d_{\Pi}^4}. \end{aligned} \quad (14)$$

Проинтегрировав по высоте Δh , уравнение (14) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta p = & (\varphi_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} + \varphi_{\mathcal{J}} \cdot \rho_{\mathcal{J}}) \cdot g \cdot \Delta h + \frac{8 \cdot \lambda_{cm} \cdot \Delta h}{\pi^2 \cdot d_{\Pi}^5} \cdot \left(\rho_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\Gamma}^2}{\varphi_{\Gamma}} + \rho_{\mathcal{J}} \cdot \frac{Q_{\mathcal{J}}^2}{\varphi_{\mathcal{J}}} \right) + \\ & + \left(\rho_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\Gamma}^2}{\varphi_{\Gamma}} + \rho_{\mathcal{J}} \cdot \frac{Q_{\mathcal{J}}^2}{\varphi_{\mathcal{J}}} \right) \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot d_{\Pi}^4}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для экспериментальных исследований в одномерной гидродинамике критерии Рейнольдса и Фруда допускается определять следующими зависимостями соответственно [4]:

$$Re_{cm} = \frac{\bar{v}_{\mathcal{J}} \cdot d_{\Pi}}{\nu_{\mathcal{J}}} + \frac{\bar{v}_{\Gamma} \cdot d_{\Pi}}{\nu_{\Gamma}}, \quad (16)$$

$$Fr_{cm} = \frac{v_{cm}^2}{g \cdot d_{\Pi}}. \quad (17)$$

В зависимости от числа Рейнольдса определяем коэффициент гидравлического сопротивления:

– для ламинарного режима

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \tag{18}$$

– для турбулентного режима

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \tag{19}$$

Критериальное уравнение коэффициента гидравлического сопротивления при движении двухфазной смеси имеет следующий вид [4, 5]:

$$\lambda_{см} = \lambda[\beta_{Ж}, Fr_{см}, Re_{см}, We, \rho, \mu, \cos(g, z)]. \tag{20}$$

При экспериментальном исследовании коэффициента гидравлического трения, учитывая допущения, изложенные в [4, 5], полагая плотности и динамические вязкости смешивающихся фаз постоянными, направление водовоздушного потока в строго вертикальной трубе, критериальное уравнение (20) принимает вид:

$$\lambda_{см} = \lambda[\beta_{Ж}, Fr_{см}, Re_{см}]. \tag{21}$$

Исследования гидравлических параметров ГЦС при эрлифтной эксплуатации проводились на экспериментальной установке в лабораторных условиях. Схема установки изображена на рис. 1.

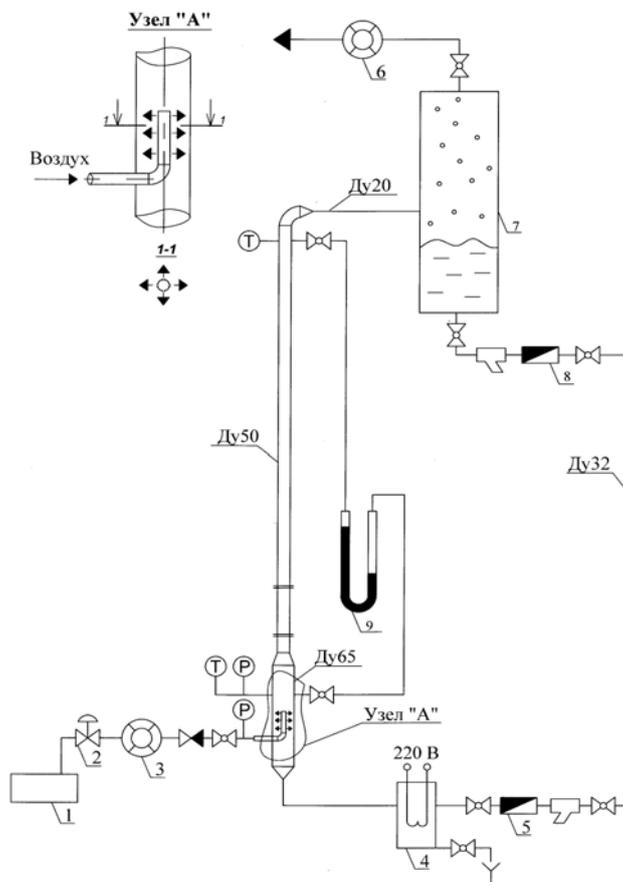


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования параметров ГЦС при эрлифтной эксплуатации: 1– компрессор; 2 – регулятор давления и расхода; 3 – счетчик газа; 4 – бак с тэном электрическим; 5 – водомер; 6 – счетчик газа; 7 – сепаратор; 8 – водомер; 9 – ртутно-водяной манометр

Воздух из компрессора 1 подается через насадок с отверстиями в подъемную трубу, где, смешиваясь с водой, образует водовоздушную смесь. Давление и расход воздуха регулируются регулятором 2. Контроль давления подаваемого воздуха осуществляется показывающим манометром, расход измеряется счетчиком газа ротационным 3. Водовоздушная смесь поднимается по подъемной трубе к сепаратору 7. Структура потока отслеживается через стеклянную цилиндрическую вставку-трубу в подъемной трубе. Для исследования гидравлических характеристик водовоздушного потока предусмотрены два пьезометра в нижней и верхней точке подъемной трубы. В сепараторе 7 происходит отделение воздуха от воды. Счетчиком газа 6 предусматривается замер количества сепарированного воздуха. Количество циркулирующей в системе воды предусматривается водомерами 5, 8. Вода с определенным расходом в контуре циркулирует непрерывно при подаче с компрессора необходимого количества воздуха с постоянным давлением.

Основные результаты

Эрлифтная циркуляция воды в экспериментальной установке исследовалась при расходах воздуха от $0,29 \cdot 10^{-4}$ до $5,4 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Расход воды в циркуляционном контуре при этом составил от $0,12 \cdot 10^{-4}$ до $1,27 \cdot 10^{-4}$ м³/с (рис. 2).

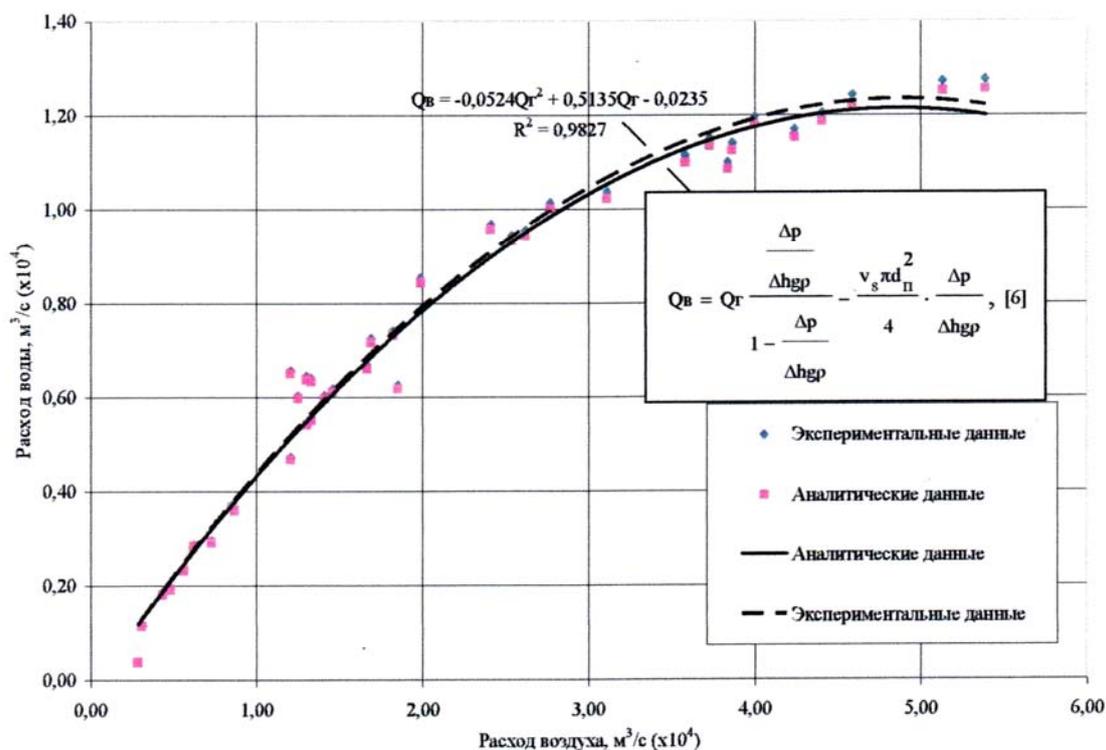


Рис. 2. Зависимость расхода воды в вертикальном водовоздушном потоке от расхода воздуха

Таким образом, при данных расходах воды и воздуха в двухфазном вертикальном потоке наблюдались ламинарный и турбулентный режимы движения двухфазного потока. Число Рейнольдса определялось по формуле (16), а коэффициент гидравлического трения в зависимости от режима течения – по формулам (18, 19).

Влияние числа Рейнольдса на коэффициент гидравлического трения в эксперименте отражено на рис. 3.

Достоверность изложенной методики определения потерь давления была проверена в ходе эксперимента. На рис. 4 изображены графики удельных потерь давления для вертикального водовоздушного потока, определенные по вышеизложенной методике и опытным путем.

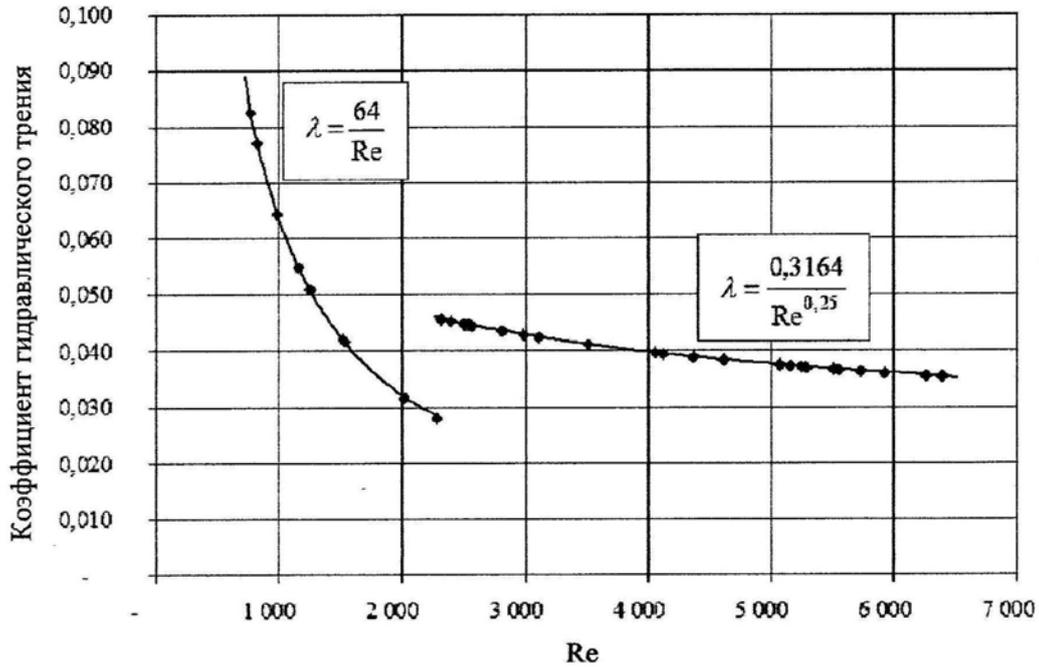


Рис. 3. Влияние числа Рейнольдса на коэффициент гидравлического трения для вертикального водовоздушного потока

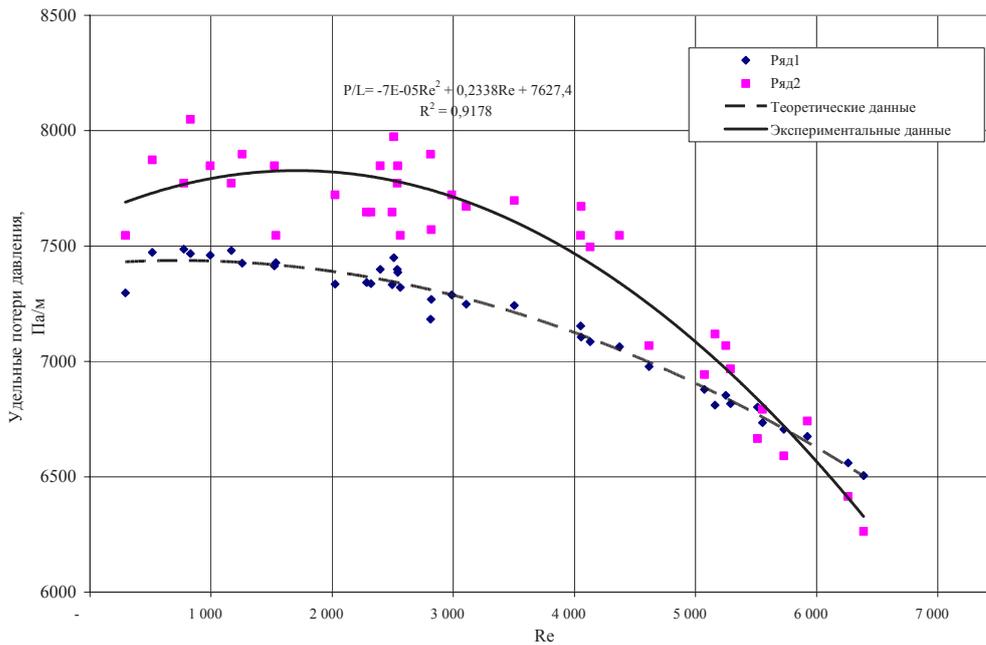


Рис. 4. Зависимость удельных потерь давления для вертикального водовоздушного потока от критерия Re

Выводы

Результаты экспериментального исследования показали, что удельный расход воздуха в эрлифте изменяется от 1,5 до 4,2 м³/с на 1 м³/с воды.

В скважине наблюдается режим движения водовоздушной смеси при Re=300...6400. Удельное гидравлическое сопротивление двухфазного потока составляет 6400÷7800 Па/м.

Сравнение известных аналитических зависимостей и экспериментальных данных

показывает необходимость их уточнения для расчета эрлифтного режима эксплуатации ГЦС теплоснабжения.

Выполненные авторами в работе [7] расчеты эрлифтного подъема жидкости для реальных условий подтверждают те же соотношения расходов жидкой фазы к газообразной и возможность получить расход жидкости порядка 450-500 м³/ч. В отличие, насосы отечественного производства на добычных скважинах могут дать расход до 100 м³/ч, а зарубежные аналоги – до 300 м³/ч.

Список литературы

1. Дядькин Ю. Д. Разработка геотермальных месторождений / Ю. Д. Дядькин – М.: Недра, 1989. – 229 с.
2. Бродский Е. М. Обоснование и выбор параметров регулируемых грунтовых насосных установок. Дис...канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1988. – 164 с.
3. Виноградов Б. В. К расчету эрлифтных установок / Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – № 2. – 2002. – С. 95–97.
4. Мамаев В. А. Гидравлика газожидкостных смесей в трубах. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
5. Папаяни Ф. А., Козыряцкий Л. Н., Пашенко В. С., Кононенко А. П. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
6. Муравьев И. М. Основы газлифтной эксплуатации скважин / И. М. Муравьев, В. И. Ямпольский – М.: Недра, 1973. – 184 с.
7. A.Red'ko, A. Kononenko, V. Bugai. Energy efficiency of geothermal circulating systems of the heat supply / Red'ko A., Kononenko A., Bugai V. // Motrol. Motoryzacja i energetyka Polnictwa. – Simferopol-Lublin. – 2009. – Vol. 11A. – pp. 64–69.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYDRAULIC MODES OF GEOTHERMAL CIRCULATING SYSTEMS OF A HEAT SUPPLY AT AIRLIFT OPERATION

A. A. RED'KO, Cand. Tech. Sci., V. S. BUGAJJ

In this article the results of an experimental research of hydraulic modes of geothermal circulating systems of a heat supply at airlift operation.

Поступила в редакцию 20.12.2009