

**И.В. КОРНЕЕВ, А.С. БАЛАБАЕВ, А.Н. ДАНИЛЬЧЕНКО, С.А. МАКСИМОВ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

## **ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ОРОСИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНВЕСТИЦИОННЫХ И ОПЕРАЦИОННЫХ ЗАТРАТ**

*Одна из технико-экономических задач, возникающих при проектировании оросительных систем, связана с поиском оптимального сочетания мощности насосной станции и пропускной способности трубопроводной напорной сети. В диапазоне допустимых скоростей движения воды в полиэтиленовых трубах может быть реализовано множество вариантов, различающихся потерями электроэнергии, обусловленными гидравлическими потерями в трубопроводах. Цель исследования – предложить способ технико-экономического обоснования оросительной сети с учетом капиталовложений и эксплуатационных затрат на машинный водоподъем. Авторами предложен подход, основанный на модификации метода оценки инвестиционных проектов, для обоснованного сравнения технических решений по оросительной сети непосредственно в процессе многовариантного проектирования мелиоративной системы. Получены аналитические формулы оптимальной мощности и расчетного оптимального напора насосной станции, позволяющие минимизировать суммарные инвестиционные и операционные затраты за все время жизни проекта. Рекомендованные формулы учитывают технические и стоимостные характеристики как насосной станции, так и трубопроводной сети, а также полностью соответствуют методике оценки мелиоративных инвестиционных проектов: учитывают разновременные затраты за все время жизни проекта, коэффициент дисконтирования, индекс инфляции. Характеристики оросительной системы учтены как в явном виде – через орошаемую площадь нетто и среднемноголетнюю оросительную норму, так и посредством эмпирического коэффициента  $k$ , который нужно получить при анализе результатов многовариантного моделирования оросительной сети при различных расчетных напорах насосной станции.*

*Мелиорация, оросительные системы, индекс инфляции, оценка инвестиционных проектов*

**Введение.** В связи с реализацией Федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014-2020 годы» возрос интерес к проектированию реконструируемых и вновь создаваемых оросительных систем для полива дождеванием. Существующие рекомендации по выбору тех или иных параметров зачастую сформулированы в иных социально-экономических условиях, поэтому их обоснованность требует уточнения.

Принимаемые проектные решения обусловлены мелиоративным режимом, который обеспечивает условия для расширенного воспроизводства почвенного плодородия, получения гарантированных урожаев сельскохозяйственных культур, экономии всех видов вовлеченных ресурсов [1].

Основной функцией мелиоративной системы является обеспечение выбранного мелиоративного режима в условиях измен-

чивой среды, погодных и климатических условий, стоимости и доступности оросительной воды и пр. Можно утверждать, что наиболее важной задачей оросительной сети (водозабора, насосной станции и трубопроводной напорной сети) является обеспечение подачи воды в требуемом режиме на требуемые точки подключения дождевальных машин в течение всего времени жизни проекта.

В статье рассмотрено технико-экономическое обоснование проектных решений по оросительной сети. Инвестиции затраты на насосную станцию и трубопроводную напорную сеть могут составлять половину стоимости проектируемой системы, а затраты на электроэнергию для машинного водоподъема могут составлять преобладающую часть годовых операционных затрат на оросительной системе.

Очевидно, что менее мощная насосная станция требует использования трубопрово-

дной сети с большей пропускной способностью (меньшими гидравлическими потерями), тогда как использование трубопроводной сети с меньшей пропускной способностью (большими потерями) требует предусмотреть более мощную насосную станцию. Таким образом, предусмотренные проектом диаметры трубопроводов влияют на величину и соотношение инвестиционных и операционных затрат. Современный этап развития мелиорации характеризуется широким применением полиэтиленовых труб, которые лучше сопротивляются гидроударам и допускают большие скорости потока воды. Появляется возможность использовать трубопроводы меньшего диаметра при высоких расчетных скоростях потока около 2,5 м/с и существенно экономить на стоимости труб, которая пропорциональна квадрату их диаметра. Необходимо учитывать, что такое решение может привести к значительному росту гидравлических потерь по длине трубопровода и повышенным затратам электроэнергии на перекачивание воды.

**Материал и методы.** Согласно действующему нормативному документу МСХ РФ [2], для сравнения вариантов проекта следует использовать метод мелиоративных инвестиционных проектов, отдавая предпочтение вариантам проекта, которые характеризуются сравнительно большим чистым дисконтированным доходом (ЧДД, NPV).

В соответствии с общепринятым подходом к одновременному учету разновременных затрат путем дисконтирования денежных потоков используем нижеприведенное выражение для чистого дисконтированного дохода (ЧДД, NPV):

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^N CF_t \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^t \quad (1),$$

где  $IC$  – общие инвестиции в мелиоративную систему;  $CF_t$  – сумма положительных и отрицательных годовых денежных потоков;  $N$  – время жизни проекта, лет;  $i$  – коэффициент инфляции;  $d$  – коэффициент дисконтирования.

Инвестиции (капитальные затраты) для решения рассматриваемой задачи можно представить как

$$IC = IC_{PS} + IC_{pipe} + IC_0, \quad (2),$$

где  $IC_{PS}$  – инвестиции в насосную станцию,  $IC_{pipe}$  – инвестиции в трубопроводную сеть, а  $IC_0$  – инвестиции в прочие элементы мелиоративной системы, которые являются неизменными при сравнении вариантов.

Сумму положительных и отрицательных годовых денежных потоков мелиоративного инвестиционного проекта можно представить как

$$CF_t = -CF_{el} \pm CF_0, \quad (3),$$

где  $CF_{el}$  – отрицательные годовые потоки (затраты) на электроэнергию для перекачки воды от водоисточника к дождевальным машинам;  $CF_0$  – все прочие годовые денежные потоки (доходы и расходы), возникающие в связи с реализацией мелиоративного инвестиционного проекта, но остающиеся неизменными при сравнении вариантов.

На протяжении всего «времени жизни» (которое, по рекомендациям [2], нужно принимать равным 25...30 годам) на экономических показателях проекта сказываются как величина инвестиций, так и ежегодные отрицательные денежные потоки, вызванные операционными затратами.

При проектировании оросительной сети все рассматриваемые варианты должны обеспечивать одинаковый расчетный режим водоподачи, но предпочтительным должен быть вариант, позволяющий минимизировать дисконтированную сумму как инвестиционных, так и операционных затрат.

Очевидно, что на абсолютную величину NPV (ЧДД) влияют как общие инвестиции в систему, так и сумма всех денежных потоков (как доходов, так и расходов). При сравнении вариантов между собой предпочтение следует отдавать тому, в котором NPV (ЧДД) больше. При сравнении вариантов, отличающихся только проектными решениями по оросительной сети, предпочтительным будет тот, который характеризуется минимальными затратами  $C_{wnet}$ :

$$C_{wnet} = IC_{PS} + IC_{pipe} + \sum_{t=1}^T CF_{el} \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^t, \quad (4)$$

Сумму затрат на оросительную сеть за все время жизни проекта запишем в виде

$$C_{wnet} = IC_{PS} + IC_{pipe} + CF_{el} \frac{\left( \frac{1+i}{1+d} \right)^T - 1}{\ln \frac{1+i}{1+d}} \quad (5)$$

Необходимо рассмотреть несколько вариантов напора насосной станции (каждому из которых соответствует определенная расчетная мощность  $N_{PS} = 9,81QH/\eta$ ) и путем выполнения гидравлических рас-

четов выбрать диаметры всех участков трубопроводной сети из условия обеспечения требуемых напоров и расходов на каждой точке подключения дождевальной машины с минимальным разумным запасом напора на гидранте. Удобнее всего это делать с помощью гидравлических компьютерных моделей, широко распространенных и описанных в литературе (3, 4). Все технические ограничения, связанные с допустимыми скоростями воды в трубопроводах, риском гидроударов и прочими требованиями стандартов должны быть учтены на этапе моделирования оросительной сети; другими словами, каждый из сравниваемых вариантов должен быть допустимым по техническим, конструктивным критериям и соответствовать требованиям безопасности.

Согласно логике решаемой задачи, необходимо установить зависимости величины инвестиционных и операционных затрат от мощности насосной станции:

$$IC_{PS} = f(N_{PS}), \quad (6)$$

$$IC_{pipe} = f(N_{PS}), \quad (7)$$

$$CF_{el} = f(N_{PS}). \quad (8)$$

**Результаты и обсуждение.** Для каждого варианта насосной станции её стоимость определяется производителем оборудования. В общем виде для любой насосной станции зависимость изменения сметной стоимости насосной станции от её мощности предлагается характеризовать выражением:

$$IC_{PS} = a \ln(N_{PS}) + b \quad (9),$$

где  $a$ ,  $b$  – константы регрессионной зависимости стоимости насосной станции от её мощности.

Для каждого варианта оросительной сети с помощью известных методов и моделей необходимо выполнить проектные расчеты по определению диаметров всех участков трубопроводов оросительной сети, после чего рассчитать средневзвешенный диаметр труб  $\bar{d}$ .

Для оценки затрат на трубопроводную сеть необходимо установить зависимость между мощностью насосной станции и средневзвешенным диаметром трубопроводной сети, которую в общем виде можно записать с помощью выражения:

$$\bar{d}^2 = k \ln(N_{PS}) + l \quad (10),$$

где  $k$ ,  $l$  – константы регрессионной зависимости средневзвешенного диаметра трубопроводной сети от мощности насосной станции.

Зависимость (10) благодаря подбору эмпирических коэффициентов при обработке результатов многовариантного гидравлического моделирования оросительной сети становится уникальной для каждой конкретной оросительной системы, поскольку в ней интегрально отражается конфигурация сети, относительная протяженность магистральных и распределительных участков, относительное высотное положение водозабора и орошаемых земель и прочее. Вышеуказанные коэффициенты, вероятно, не удастся использовать по аналогии для иных оросительных систем, поэтому придется получать их заново с помощью гидравлической модели системы.

Стоимость трубопровода в каждом из вариантов оросительной сети с характерным средневзвешенным диаметром  $\bar{d}$  пропорциональна массе полиэтилена, затраченного на изготовление 1 п.м. такой трубы:

$$M_{\bar{d}} = \bar{d}^2 \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{ПЭ}, \quad (11),$$

где  $SDR$  – соотношение диаметра трубы к толщине ее стенки;

$\rho_{ПЭ}$  – плотность полиэтилена ПЭ100 (954 кг/м<sup>3</sup>).

С учетом стоимости 1 кг полиэтилена марки ПЭ100  $C_{ПЭ}$  и суммарной длины  $L$  всех труб оросительной сети, а также выражения (10), выражение (7) получит вид:

$$IC_{pipe} = M_{\bar{d}} \cdot C_{ПЭ} \cdot L = (k \ln(N_{PS}) + l) \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{ПЭ} C_{ПЭ} L \quad (12)$$

Среднегодовые затраты электроэнергии пропорциональны времени, которое требуется для перекачки всего годового объема поливной воды при расчетной мощности насосной станции:

$$CF_{el} = N_{PS} C_{el} \frac{M_{irr} \cdot S}{Q_{ps}} \quad (13),$$

где  $C_{el}$  – цена 1 кВт ч электроэнергии, руб.;

$M_{irr}$  – среднесезонная оросительная норма, куб.м/га;

$S$  – площадь орошаемых земель, га

$Q_{ps}$  – расчетная подача насосной станции, куб. м/ч.

Суммарные затраты с учетом зависимостей (9), (12), (13) имеют вид:

$$C_{unet}(N_{PS}) = a \ln(bN_{PS} + c) + (k \ln(N_{PS}) + l) \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{\Pi \Sigma 100} C_{\Pi \Sigma 100} L + N_{PS} C_{el} \frac{M_{irr} S \left( \frac{1+i}{1+t} \right)^T - 1}{Q_{ps} \ln \frac{1+i}{1+t}}, \quad (14)$$

Полученное выражение является суммой нескольких функций  $N_{PS}$ , каждая из которых дифференцируема. Для поиска экстремума функции найдём ее производную по  $N_{PS}$  и приравняем к нулю:

$$\frac{a}{N_{PS}} + \frac{k}{N_{PS}} \cdot \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{\Pi \Sigma} C_{\Pi \Sigma} L + C_{el} \frac{M_{irr} S \left( \frac{1+i}{1+t} \right)^T - 1}{Q_{ps} \ln \frac{1+i}{1+t}} = 0 \quad (15)$$

Выразим  $N_{PS}$ :

$$N_{PS} = Q_{ps} \cdot \frac{\left\{ -k \cdot \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{\Pi \Sigma} C_{\Pi \Sigma} L - a \right\} \cdot \ln \frac{1+i}{1+t}}{C_{el} \cdot M_{irr} \cdot S \cdot \left( \frac{1+i}{1+t} \right)^T - 1}, \quad (16)$$

Тогда оптимальный расчетный напор насосной станции:

$$H_{PS} = \frac{\eta_{PS}}{9,81 \cdot Q_{PS}} \cdot \frac{\left\{ -k \cdot \frac{\pi(SDR-1)}{SDR^2} \rho_{\Pi \Sigma} C_{\Pi \Sigma} L - a \right\} \cdot \ln \frac{1+i}{1+t}}{C_{el} \cdot M_{irr} \cdot S \cdot \left( \frac{1+i}{1+t} \right)^T - 1} \quad (17)$$

### Выводы

Полученные зависимости (16) и (17) содержат технические и стоимостные характеристики как насосной станции, так и трубопроводной сети, а также полностью соответствуют методике оценки мелиоративных инвестиционных проектов: учитывают разновременные затраты за все время жизни проекта, коэффициент дисконтирования, индекс инфляции. Характеристики оросительной системы учтены как в явном виде – через орошаемую площадь нетто и среднемноголетнюю оросительную норму, так и посредством эмпирического коэффициента  $k$ , который нужно получить при анализе результатов многовариантного моделирования оросительной сети при различных расчетных напорах насосной станции.

Предложенный подход позволяет оптимизировать параметры оросительной сети с учетом инвестиционных затрат на на-

сосную станцию и трубопровод и операционных затрат на электроэнергию.

### Библиографический список

1. Мелиорация земель. Учебник под ред. Голованов А.И. – СПб: Лань, 2015. – 816 с.
2. Методические рекомендации, по оценке эффективности инвестиционных проектов мелиорации сельскохозяйственных земель / РД-АПК 300.01.003-03 утверждено Минсельхозом РФ 24.01.2003 г.
3. EPANET. Model for Water Distribution Piping Systems / <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
4. Computer Models. EPANET™ in L. Mays, ed., Water Distribution Systems Handbook. Chapter 12 / Rossman, L. A. – New York, NY. McGraw-Hill companies, Inc., 1999.

Материал поступил в редакцию 09.01.2018 г.

### Сведения об авторах

**Корнеев Илья Викторович** кандидат технических наук, доцент кафедры мелиорации и рекультивации земель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязева, д.49; тел.: 8 (499) 9764778, e-mail: [ilia.korneev@rgau-msha.ru](mailto:ilia.korneev@rgau-msha.ru)

**Балабаев Алексей Сергеевич** ассистент кафедры мелиорации и рекультивации земель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязева, 49; тел.: 8 (499) 9764778, e-mail: [aleksei\\_balabaev@mail.ru](mailto:aleksei_balabaev@mail.ru)

**Данильченко Анатолий Николаевич** кандидат технических наук, доцент кафедры мелиорации и рекультивации земель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязева, 49; тел.: 8 (499) 976-4778, e-mail: [a.n.danilchenko@mail.ru](mailto:a.n.danilchenko@mail.ru)

**Максимов Сергей Алексеевич** кандидат технических наук, доцент кафедры мелиорации и рекультивации земель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Тимирязева, 49; тел.: 8 (499) 9764778, e-mail: [s.a.maksimov@mail.ru](mailto:s.a.maksimov@mail.ru)

I.V. KORNEEV, A.S. BALABAEV, A.N. DANILJCHENKO, S.A. MAKSIMOV

Federal state budgetary institution of higher education Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, Moscow, the Russian Federation

## ABOUT OPTIMIZATION OF PROJECT DECISIONS ON IRRIGATION SYSTEMS ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF INVESTMENT AND OPERATIONAL COSTS

*One of the technical and economic problems in the design of irrigation systems is to search for an optimal combination of the pumping station's power and the allowable hydraulic losses in the pipes of irrigation network. In the range of allowable velocities in polyethylene pipes a variety of options can be realized, differing in energy losses caused by hydraulic losses in pipelines. The purpose of the study is to propose a method for the feasibility study of the irrigation network, taking into account the investment and operating costs of water supply. There is proposed an approach based on the method modification for evaluating investment projects, for a reasonable comparison of technical solutions for the irrigation network directly in the process of multivariate design of the reclamation system. Analytical formulas of the optimal capacity and optimal pressure head of the pumping station are obtained which allow minimizing total investment and operating costs for the whole project lifetime. The recommended formulas take into account technical and cost characteristics of both the pumping station and pipeline network, and also fully comply with the estimating methodology of land reclamation investment projects: take into account the time-consuming costs for the project lifetime, discount factor, inflation index. The characteristics of the irrigation system are taken into account both explicitly – through the irrigated net area and the average annual irrigation rate, and by means of the empirical coefficient  $k$  which must be obtained by analyzing the results of multi-variant modeling of the irrigation network at various rated heads of the pumping station.*

*Land reclamation, irrigation systems, inflation index, assessment of investment projects*

### Reference list

1. Melioratsiya zemel. Uchebnik pod red. Golovanov A.I. – SPb: Lanj, 2015. – 816 s.
2. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnyh projektov melioratsii sel'skokozyajstvennyh zemel / RD-APK 300.01.003-03 utverzhdeno Minsel'hozom RF 24.01.2003 g.
3. EPANET. Model for Water Distribution Piping Systems / <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
4. Computer Models. EPANET™ in L. Mays, ed., Water Distribution Systems Handbook. Chapter 12 / Rossman, L.A. – New York, NY. McGraw-Hill companies, Inc., 1999.

The material was received at the editorial office  
09.01.2018

### Information about the authors

**Korneev Ilya Victorovich**, candidate of technical sciences, associate professor of chair of land reclamation and recultiva-

tion FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Timiryazeva, 49; tel.: 8 (499) 9764778, email: [ilia.korneev@rgau-msha.ru](mailto:ilia.korneev@rgau-msha.ru)

**Balabaev Alexei Sergeevich**, assistant of the chair of land reclamation and recultivation FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Timiryazeva, 49; tel.: 8 (499) 9764778, e-mail: [aleksei\\_balabaev@mail.ru](mailto:aleksei_balabaev@mail.ru)

**Danilchenko Anatolij Nikolaevich**, candidate of technical sciences, associate professor of chair of land reclamation and recultivation FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Timiryazeva, 49; tel.: 8 (499) 9764778, email: [a.n.danilchenko@mail.ru](mailto:a.n.danilchenko@mail.ru)

**Maksimov Sergej Alekseevich**, candidate of technical sciences, associate professor of chair of land reclamation and recultivation FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Timiryazeva, 49; tel.: 8 (499) 9764778, email: [s.a.maksimov@mail.ru](mailto:s.a.maksimov@mail.ru)