

## МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674:626.824

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-2-74-93

### Гидравлические исследования поливного модуля системы комбинированного орошения

**Михаил Николаевич Лытов**

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал  
Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,  
Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

**Аннотация. Цель:** установление гидравлических характеристик и определение приоритетных направлений совершенствования конструкций поливного модуля комбинированного – капельного и микроспринклерного – орошения. **Материалы и методы.** Исследование построено на совместном использовании теоретических методов – известной математической модели для расчета гидравлических характеристик поливного модуля и эксперимента, что позволяет оценить состояние проблемы и масштабировать решения в любых необходимых пропорциях. **Результаты.** Согласно расчетам, при установке на капельную линию до шести микроспринклеров равномерность осадков сохраняется на приемлемом уровне при нижнем уровне напора в пределах 1,56–1,68 атм. При установке восьми дождевателей напор воды по длине капельного трубопровода снижался до недопустимых 1,39–1,40 атм. Экспериментальные исследования показали, что выше уровня 1,5 атм. оказался только вариант, где на трубопровод устанавливали только два дождевателя. Уже при установке четырех дождевателей напор воды по длине трубопровода снижался до 1,45–1,47 атм. При этом вариация фактической производительности микроспринклеров достигала 16 % и более. Расхождение опытных и модельных данных объясняется тем, что в расчетной модели не в полной мере учитываются местные сопротивления, возникающие при присоединении дождевателей. **Выводы.** Выявлены две основные причины повышения неравномерности распределения поливной воды по площади орошения. Первая причина состоит в существенном увеличении расхода воды в поливном трубопроводе при совместной работе капельных водовыпусков и дождевателей. Решение этой проблемы состоит в разработке конструкций, позволяющих разделить во времени поток воды через капельницы и через дождеватели. Второй причиной является увеличение местных сопротивлений в узлах отвода воды к дождевателям. Решение этой проблемы состоит в разработке специальных конструкций отвода воды, которые бы характеризовались минимальным местным сопротивлением.

**Ключевые слова:** комбинированное орошение, гидравлические исследования, потери напора, разделение потока, местные сопротивления, равномерность полива

**Для цитирования:** Лытов М. Н. Гидравлические исследования поливного модуля системы комбинированного орошения // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 2. С. 74–93. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-2-74-93>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

**Hydraulic studies of the irrigation module of combined irrigation systems**



## Mikhail N. Lytov

All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

**Abstract. Purpose:** to state hydraulic characteristics and determine priority directions for improving the irrigation module design for combined drip and micro-sprinkler irrigation. **Materials and methods.** The study is based on the joint use of theoretical methods – a well-known mathematical model for calculating the hydraulic characteristics of the irrigation module and experiment, which allows assessing the problem state and scale solutions in any necessary proportions. **Results.** According to calculations, the uniformity of watering is maintained at an acceptable level at a lower head level in the range of 1.56–1.68 atm when installing six microsprinklers on a drip line. When installing eight sprinklers, the water head along the length of the drip pipeline decreased to an unacceptable 1.39–1.40 atm. Experimental studies have shown that there is only an option with two sprinklers installed on the pipeline above the level of 1.5 atm. Already with the installation of four sprinklers, the water head along the length of the pipeline decreased to 1.45–1.47 atm. At the same time, the variation in the actual microsprinkler performance reached 16 % or more. The discrepancy between experimental and model data is explained by the fact that the calculation model does not fully take into account local resistances that arise when connecting sprinklers. **Conclusions.** Two main reasons of the increased uneven distribution of irrigation water over the irrigated area have been identified. The first reason is a significant increase in water flow in the irrigation pipeline when emitters and sprinklers work together. The solution to this problem is to develop structures that make it possible to separate the water flow through emitters and through sprinklers in time. The second reason is an increase in local resistance in the water diversion units to the sprinklers. The solution to this problem is to develop special water diversion structures that would be characterized by minimal local resistance.

**Keywords:** combined irrigation, hydraulic studies, head loss, flow separation, local resistance, uniformity of irrigation

**For citation:** Lytov M. N. Hydraulic studies of the irrigation module of combined irrigation systems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(2):74–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-2-74-93>.

**Введение.** Системы комбинированного орошения являются одним из сравнительно новых направлений технического творчества в области гидромелиорации, которое может быть позиционировано в качестве фундаментальных инноваций как в технике, так и в технологии орошения [1–3]. В отличие от глобального, – несомненно, важного – тренда цифровизации и применения искусственного интеллекта в решении задач управления мелиорациями, здесь инновации касаются непосредственно материальной части, предлагается принципиально новый подход к разработке технических средств орошения и технологий, основанных на сочетании различных способов орошения. Собственно, концепция комбинированного орошения

и состоит в объединении преимуществ различных способов и технологий полива в рамках единого технологического цикла орошения сельскохозяйственной культуры [4, 5]. Ключевым условием является то, что технология комбинированного орошения реализуется на базе единой технической системы, без дублирования основных функциональных узлов. Важным преимуществом комбинированного орошения является возможность использования различных способов полива для создания комплекса управляемых факторов жизни, когда помимо регулирования водного режима почвы имеется возможность регулирования микроклимата, компенсации экстремальных проявлений климата и природных явлений и т. д. [6, 7].

Настоящая работа включает результаты гидравлических исследований поливного модуля системы, представляющей собой комбинацию капельного и микроспринклерного орошения. Интеграция различных способов полива в рамках единой технической системы предполагает совместимость гидравлических характеристик функциональных модулей на том уровне, который отвечает требованиям технологического процесса полива. Это является основным и, пожалуй, тем самым узким местом в реализации концепции комбинированного орошения.

Целью настоящего исследования является установление гидравлических характеристик и определение приоритетных направлений совершенствования конструкций поливного модуля комбинированного – капельного и микроспринклерного – орошения, обеспечивающих гарантированное выполнение технологического процесса.

**Материалы и методы.** Исследование построено на совместном использовании теоретических методов – известной математической модели [8–10], используемой для расчета гидравлических характеристик поливного модуля системы комбинированного орошения, и эксперимента, что позволяет реально оценить состояние проблемы и масштабировать решения в любых необходимых пропорциях. В основу теоретической части исследования

положен алгоритм расчета гидравлических параметров поливного модуля комбинированной системы орошения, который позволяет определить расходно-напорные характеристики для любого узла водовода на заданном участке [11]. Алгоритм позволяет для любого расчетного сечения системы определять расход воды путем сложения расходов всех водовыпусков, расположенных после сечения. Алгоритм включает определение скорости течения воды для выбранного сечения:

$$V_{calc} = \frac{4Q_{calc}}{\pi d^2},$$

где  $V_{calc}$  – расчетная скорость течения воды в заданном сечении трубопровода, м/с;

$Q_{calc}$  – суммарный расход воды для расчетного сечения, м<sup>3</sup>/с;

$d$  – диаметр трубопровода в расчетном сечении, м.

Потери напора по длине расчетного участка определяются по известной зависимости [12–14]:

$$\Delta H_{L\_calc} = \lambda \cdot \frac{l_{calc} \cdot V_{calc}^2}{d \cdot 2g},$$

где  $\Delta H_{L\_calc}$  – потери напора по длине расчетного участка водовода системы комбинированного орошения, м;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$l_{calc}$  – длина расчетного участка, м;

$g$  – ускорение свободного падения, приблизительно равное 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Величина коэффициента гидравлического трения определяется с учетом режим а течения воды по значению числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\gamma},$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;

$\gamma$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

При  $Re < 2320$ , характеризующем ламинарное течение воды, коэффициент гидравлического трения определится соотношением:

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

При величине числа Рейнольдса в диапазоне  $4000 < Re < 10 \cdot \frac{d}{k_{\text{Э}}}$ , где  $k_{\text{Э}}$  – эквивалент шероховатости трубы, мм, коэффициент гидравлического трения определялся по формуле:

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

При  $10 \cdot \frac{d}{k_{\text{Э}}} < Re < 560 \cdot \frac{d}{k_{\text{Э}}}$  алгоритм предусматривает использование выражения:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_{\text{Э}}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

а при  $Re > 560 \cdot \frac{d}{k_{\text{Э}}}$  было предусмотрено использование формулы:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_{\text{Э}}}{d} \right)^{0,25}.$$

Алгоритм реализует локальное определение потерь напора по приведенным зависимостям для участков, характеризующихся однородными условиями и расположенных между узловыми точками [11]. В качестве узловых точек используются сечения, в которых меняются расходные характеристики и скорость течения воды. Для водоводов различного уровня это узлы отвода воды в трубопроводы следующего уровня, для поливных трубопроводов это встроенные водовыпуски или отводы к внешним водовыпускам.

Местные потери напора зависят от конструкции трубопроводов, организации отвода воды, поворотов, размещения и конструкции запорно-регулирующей арматуры, конструкций водовыпусков и т. д. В качестве

одного из подходов к учету местных потерь в системах капельного орошения было принято использование эмпирических коэффициентов:

$$\Sigma \Delta H_{calc} = k_{\text{м.с.}} \cdot \Delta H_{L\_calc},$$

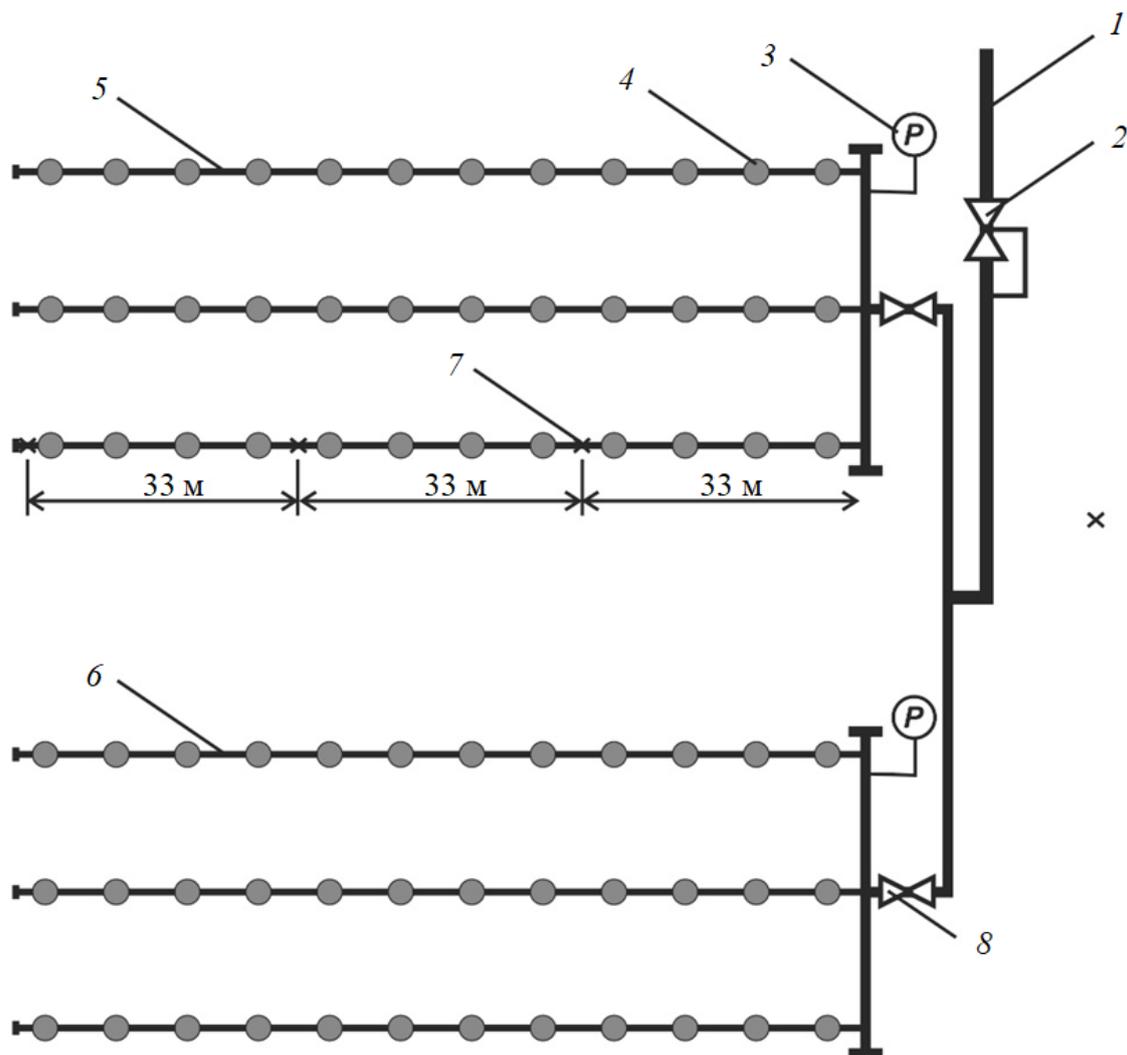
где  $\Sigma \Delta H_{calc}$  – суммарные потери напора для расчетного участка системы капельного орошения, м;

$k_{\text{м.с.}}$  – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий потери напора на местных сопротивлениях.

С учетом конструктивного разнообразия местных сопротивлений, этот метод нами был использован и для систем комбинированного орошения. При этом для поливных трубопроводов комбинированного орошения значение коэффициента  $k_{\text{м.с.}}$  определялось экспериментально.

Параллельно теоретическим расчетам проводилось экспериментальное определение напорно-расходных характеристик системы комбинированного орошения на уровне поливных трубопроводов (рисунок 1).

Именно этот сегмент системы комбинированного орошения отличается наибольшими конструктивными изменениями, что имеет определяющее значение при расчете гидравлических характеристик и проектировании таких систем. Экспериментальный контроль потерь напора осуществляли для вариантов, включающих последовательное увеличение количества подключенных дождевальных аппаратов: 0 (контроль, только капельный полив), 2, 4, 6, 8, 10, 12. Исследования проводили в комбинациях: 1 – капельный трубопровод плюс малообъемные дождевальные аппараты (микроспринклеры); 2 – «слепой» трубопровод плюс малообъемные дождевальные аппараты (микроспринклеры). Во втором случае моделировалась возможность блокирования капельных водовыпусков и перенаправления потоков, оценивались изменения напорно-расходных характеристик системы, если бы эта возможность была реализована.



1 – распределительный трубопровод; 2 – регулятор давления; 3 – манометр;  
4 – дождевальная аппаратура (микроспринклер); 5 – капельный трубопровод  
с интегрированными капельницами; 6 – «слепой» трубопровод (без капельных  
водоотпусков); 7 – зона измерения напора воды в трубопроводе; 8 – шаровый кран  
1 – distribution pipeline; 2 – pressure regulator; 3 – pressure gauge; 4 – sprinkler  
(microsprinkler); 5 – drip pipeline with integrated emitters; 6 – “blind” pipeline (without  
drip outlets); 7 – zone for measuring water head in the pipeline; 8 – ball valve

**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки**

**Figure 1 – Experimental plant diagram**

Система оборудована капельной трубкой с интегрированными капельницами компенсированного типа Irri-Go-35 mls. Производительность одной капельницы 2,0 л/ч, водоотпуски на поливном трубопроводе расположены через 0,33 м. Для устройства дождевального яруса были использованы дождевальные аппараты микроспринклерного типа Aquamic AQ-210 Rotor Orange (1,2 мм). Диаметр эффективного смачивания микроспринкле-

ра 4,0 м, по длине поливного трубопровода устанавливались через 8,0 м. Схема расстановки дождевателей в составе системы – в шахматном порядке (со смещением на 1/2 шага).

Измерение напора воды проводили в четырех равноудаленных зонах по длине поливного трубопровода, соответственно на расстоянии 0, 33, 66 и 99 м. Измерения проводились манометром ТМ-610 МТИ, соединяемым с поливным трубопроводом посредством радиально установленного отвода воды и микротрубки 4 × 6 мм. Для измерения фактической производительности капельниц использовали градуированные резервуары, которые устанавливали через 8 м по длине поливного трубопровода. Фактическую производительность дождевальных аппаратов измеряли путем погружения работающего микроспринклера в мерный резервуар емкостью 1 л на 30 с.

**Результаты и обсуждение.** В таблице 1 приведены значения основных гидравлических показателей системы комбинированного орошения, сочетающего капельный способ полива и малообъемное дождевание. К настоящему времени это наиболее апробированная технология комбинированного орошения, преимущества которой подтверждены опытами по регулированию гидротермического режима агрофитоценозов и компенсации экстремальных проявлений климата. Измерения проводились по четырем сечениям поливного – капельного – трубопровода общей протяженностью 100 м. Такая длина поливного трубопровода типична для большинства проектируемых сегодня модулей капельного орошения, что может быть важным с точки зрения внедрения разработок в практику орошаемого земледелия. В таблице 1 приведены результаты моделирования напорных и расходных характеристик поливного трубопровода, а также результаты экспериментальных измерений, реализованных в сопоставимых условиях. Измерения проводились с последовательным увеличением числа дождевателей, одновременно подключенных к капельному трубопроводу, за контроль принят вариант без дождевателей.

**Таблица 1 – Результаты гидравлических исследований капельного поливного трубопровода в составе системы комбинированного орошения**

**Table 1 – Results of hydraulic studies of drip irrigation pipeline as a part of the combined irrigation system**

Число дождевателей, шт.	Показатель	Место измерения от начала трубопровода, м				$k_{м.с.}$
		0	33	66	99	
Расчетные данные						
0	$Q$ , л/ч	608	408	208	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,92	1,84	1,83	
2	$Q$ , л/ч	756	408	208	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,88	1,79	1,78	
4	$Q$ , л/ч	897	408	208	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,77	1,69	1,68	
6	$Q$ , л/ч	960	542	208	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,68	1,57	1,56	
8	$Q$ , л/ч	1083	665	208	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,58	1,40	1,39	
10	$Q$ , л/ч	1131	714	327	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,47	1,23	1,21	
12	$Q$ , л/ч	1226	814	433	8	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,38	1,09	1,03	
Экспериментальные данные						
0	$Q$ , л/ч	608	408	208	8	1,33
	$H$ , атм.	2,13	1,89	1,80	1,78	
2	$Q$ , л/ч	752	408	208	8	1,72
	$H$ , атм.	2,13	1,77	1,68	1,67	
4	$Q$ , л/ч	882	408	208	8	2,02
	$H$ , атм.	2,13	1,55	1,47	1,45	
6	$Q$ , л/ч	995	527	208	8	2,18
	$H$ , атм.	2,13	1,36	1,20	1,19	
8	$Q$ , л/ч	1092	628	208	8	2,27
	$H$ , атм.	2,13	1,17	0,91	0,89	
10	$Q$ , л/ч	1117	712	305	8	2,30
	$H$ , атм.	2,13	1,05	0,68	0,64	
12	$Q$ , л/ч	1182	779	384	8	2,32
	$H$ , атм.	2,13	0,95	0,49	0,42	

Так как капельные водовыпуски, интегрированные в поливной трубопровод, компенсированные, коррекция расходов капельниц при изменении напоров в системе не проводилась. Производительность микроспринклеров в зависимости от напора в системе корректировалась по паспортной зависимости для данной конструкции:

$$Q' = 19,5 \cdot H + 35,$$

где  $Q'$  – значение расхода дождевателя при фактическом напоре воды в трубопроводе, л/ч;

$H$  – фактический напор воды в узле присоединения дождевателя.

Кроме того, фактическая производительность микроспринклеров контролировалась также опытным путем.

Расход воды в головном сечении капельного трубопровода без дождевателей составляет 608 л/ч, что в целом соответствует заявленным расходным характеристикам при длине 100 м. И расчетные, и опытные данные показывают пропорциональное увеличение расхода воды с подключением новых дождевателей. Согласно расчетным данным, при размещении 12 микроспринклеров с диаметром смачивания 8,0 м для покрытия стандартного 100-метрового модуля расход воды в головном сечении трубопровода увеличивается до 1226 л/ч. Опытные данные измерения расхода воды при подключении 12 микроспринклеров составили 1182 л/ч. Различия с модельными данными незначительные и объясняются динамикой фактических напоров воды по длине поливного трубопровода. Приведенные данные характеризуют практически двукратный рост расхода воды, что может быть значимым фактором в формировании эпюры распределения напоров по длине трубопровода.

Напор в голове поливного трубопровода во всех вариантах поддерживали на уровне 2,13 атм. (22 м). При проведении анализа важно учитывать, что для используемого типа дождевателей падение напора в 0,4 атм. снижает производительность на 10 %, а уменьшение напора на 0,6 атм. сопровождается увеличением неравномерности осадков до 15 %. Считаем этот уровень критическим для систем комбинированного орошения в плане выполнения технологического процесса и достижения поставленных целей по компенсации климатических рисков. В связи с этим, особое вни-

вание необходимо уделить отметке в 1,5 атм., переход через которую связан с превышением допустимого уровня дифференцирования расходов и увеличения неравномерности осадков по длине трубопровода.

Опытные и расчетные данные показывают ускоренное снижение напора в первой трети длины поливного трубопровода с замедлением процесса в последующем. Это типичная форма кривых напора для капельных трубопроводов, которая связана с равномерным отбором воды для полива по длине. Равномерное присоединение дождевателей по длине трубопровода принципиально картину не меняет, так как физика процесса в полной мере сохраняется. Таким образом, напор воды, созданный в голове трубопровода, быстро теряется и практически  $2/3$  капельной линии работает уже на сниженном давлении.

Исследования показали, что расчетные кривые напоров, определенные по длине поливного (капельного) трубопровода, и кривые, построенные по экспериментальным данным, существенно различаются. Согласно расчетам при установке на капельную линию до шести малообъемных дождевателей равномерность осадков должна сохраняться на приемлемом уровне, нижний уровень напора воды спрогнозирован в пределах 1,56–1,68 атм. При установке уже восьми дождевателей напор воды по длине капельного трубопровода снижался до 1,39–1,40 атм., что в сочетании с напорно-расходными характеристиками используемых микроспринклеров приводит к недопустимым изменениям равномерности осадков. Следует подчеркнуть, что линейная расходно-напорная характеристика присуща большинству известных конструкций дождевальных аппаратов. Поэтому приведенные данные будут справедливы и при использовании микроспринклеров других производителей, отличных от тех, которые были приобретены для проведения эксперимента.

Установка 10 и 12 дождевателей еще в большей мере усугубляет проблему. Теоретические расчеты показывают, что при установке 12 дождева-

телей напор воды в поливном трубопроводе снижается до 1,03 атм., а потери напора достигают 1,1 атм.

Однако экспериментальные исследования показали еще более плохую динамику напоров с существенным увеличением потери давления по длине трубопровода. Выше отсечного уровня в 1,5 атм. оказался только вариант, где на трубопровод устанавливали только два дождевателя. Уже при установке четырех дождевателей напор воды по длине трубопровода снижался до 1,45–1,47 атм. Хотя работоспособность дождевателей при этом и сохранялась, однако вариация фактической производительности микроспринклеров достигала 16 % и более. При установке 8, 10 и 12 дождевателей падение напора в капельном трубопроводе достигало 1,2–1,7 атм., а давление в последней трети капельной линии не превышало 0,4–0,9 атм. Это вообще выходит за границы рабочего диапазона напоров большинства дождевателей микроспринклерного типа.

Чем вызваны такие различия между модельными данными и результатами экспериментального измерения напоров по длине капельного трубопровода с подключенными дождевателями? Анализируя эту проблему, мы обратили внимание, что расчетная и экспериментальная кривые напоров для капельных линий без дождевателей практически идентичны. Тогда как подключение дождевателей эту сходимость нарушает, и тем в большей степени, чем больше микроспринклеров было подключено. Было сделано предположение: расхождение опытных и модельных данных может объясняться тем, что в расчетной модели не в полной мере учитываются местные сопротивления, по крайней мере те, что возникают при присоединении дождевателей. Это предположение находит подтверждение и при изучении конструкции современных старт-коннекторов микротрубки, посредством которой осуществляется соединение с дождевателями (рисунок 2).

Как видно из рисунка 2, конструкция старт-коннектора в значитель-

ной мере перекрывает просвет трубопровода, что, безусловно, создает местные сопротивления, которые могут играть значимую роль в формировании эпюры напоров по длине трубопровода. Влияние вводимых местных сопротивлений может усугубляться увеличением скорости потока воды из-за увеличения совокупных расходов при совместной работе капельных водовыпусков и дождевателей.



**Рисунок 2 – Старт-коннектор микротрубки дождевателя в просвете капельного трубопровода (фото М. Н. Лытова, 2023 г.)**

**Figure 2 – Start connector for the sprinkler micropipe in the drip pipeline lantern (photo by M. N. Lytov, 2023)**

Действительно, в расчетах местные сопротивления учитывались путем введения специального, эмпирически определяемого, коэффициента  $k_{\text{м.с.}}$ . Для капельных трубопроводов с интегрированными капельницами такой коэффициент был принят равным 1,3 [11].

Однако обратный расчет по экспериментальным данным позволил определить фактические значения коэффициента  $k_{\text{м.с.}}$ , с учетом дополнительно вводимых в систему местных сопротивлений. Как видно из данных таблицы 1, значения этих коэффициентов оказались значительно выше принятых, тогда как последние были близки к фактическим только при исследовании капельных трубопроводов без дождевателей. Уже при подключении двух дождевателей значение коэффициента  $k_{\text{м.с.}}$  возросло до 1,72, при четырех достигло 2,02 и далее, пропорционально увеличиваясь, составило 2,32 при подключении 12 дождевателей.

Таким образом, решение по конструкции старт-коннектора, снижающее местные потери напора, могло бы стать фактором, обеспечивающим переход к потерям напора по длине трубопровода, которые будут близки к теоретическим (расчетным).

Однако даже при решении проблемы местных сопротивлений распределение напоров по длине трубопровода остается таким, которое не может быть приемлемым при практическом использовании технологии комбинированного орошения. Из-за увеличения расхода воды за счет подключения новых потребителей – дождевателей системы комбинированного орошения потери напора таковы, что позволяют распространить дождевание только на 50 м, т. е. на половину от стандартного, 100-метрового орошаемого модуля. Совокупный расход воды в головном сечении поливного (капельного) трубопровода при подключении 12 дождевателей, согласно расчетам, составляет 1226 л/ч, из которых 608 л/ч – это подача воды через капельницы и 618 л/ч – это подача воды через дождеватели. Обращает на себя внимание тот факт, что расход воды через дождеватели практически равен расходу воды через капельные водовыпуски системы. Видится целесообразным разделение потоков во времени, т. е. использование одного технологического времени для проведения поливов капельным способом и другого технологического времени для проведения поливов способом дождевания. При этом использование единого капельного трубопровода для этих потоков остается принципиальным моментом. В этом случае разделение потоков может быть осуществлено за счет разработки конструкции блокирующей капельницы. Триггером блокирования такой капельницы может стать изменение рабочего давления в системе, что оправдано, так как рабочие напоры дождевателей в 2,0–2,5 раза больше, чем капельных водовыпусков. Исследованиями такое решение смоделировано за счет использования «слепых» трубопроводов, которые во всем идентичны капельным, за исключением оснащения встроенными капельными водовы-

пусками. Результаты расчета гидравлических параметров такого трубопровода, а также фактически измеренные значения напоров и расходов при разном количестве установленных дождевателей приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Результаты гидравлических исследований «слепого» трубопровода в составе системы комбинированного орошения**

**Table 2 – Results of hydraulic studies of the “blind” pipeline as part of a combined irrigation system**

Число дождевателей, шт.	Показатель	Место измерения от начала трубопровода, м				$k_{м.с.}$
		0	33	66	99	
Расчетные						
2	$Q$ , л/ч	153	0	0	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	2,12	2,12	2,12	
4	$Q$ , л/ч	305	0	0	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	2,09	2,09	2,09	
6	$Q$ , л/ч	449	149	0	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	2,03	2,03	2,03	
8	$Q$ , л/ч	523	295	0	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,99	1,96	1,96	
10	$Q$ , л/ч	586	360	143	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,91	1,84	1,83	
12	$Q$ , л/ч	710	487	275	0	1,30
	$H$ , атм.	2,13	1,84	1,72	1,69	
Экспериментальные						
2	$Q$ , л/ч	153	0	0	0	1,71
	$H$ , атм.	2,13	2,12	2,12	2,12	
4	$Q$ , л/ч	303	0	0	0	1,79
	$H$ , атм.	2,13	2,08	2,08	2,08	
6	$Q$ , л/ч	448	147	0	0	1,83
	$H$ , атм.	2,13	1,99	1,98	1,98	
8	$Q$ , л/ч	584	286	0	0	1,87
	$H$ , атм.	2,13	1,87	1,83	1,83	
10	$Q$ , л/ч	635	412	135	0	1,90
	$H$ , атм.	2,13	1,77	1,65	1,65	
12	$Q$ , л/ч	743	521	255	0	1,93
	$H$ , атм.	2,13	1,68	1,47	1,44	

Как видно из данных таблицы 2, максимальный расход воды в головном сечении поливного трубопровода при подключении всех 12 дождевателей составляет 710 л/ч по расчетам или 743 л/ч по физическому измерению. Потери напора в соответствии с расчетами остаются приемлемыми, в т. ч.

при распределении дождевателей на всю длину 100-метрового трубопровода, и при установке 12 дождевателей не превышали 0,44 атм. При такой разнице микроспринклеры обеспечивают достаточную равномерность полива, различия в производительности дождевателей по длине трубопровода не превышают 10 %.

Однако экспериментальные оценки показывают другие результаты, иное распределение эпюры напоров по длине поливного трубопровода. Потери напора в экспериментальных исследованиях оказались существенно выше.

При установке 12 дождевателей, обеспечивающих покрытие по длине трубопровода не менее 100 м, падение напора достигало 0,69 атм., а как минимум в трети трубопровода напор был меньше 1,5 атм. Это выходит за границы приемлемого диапазона, существенно увеличивая неравномерность осадков по площади орошения. При установке 10 дождевателей падение напора по длине трубопровода находится на приемлемом уровне, однако совокупная длина зоны смачивания при этом не превышает 80 м, т. е. на стандартных модулях, где осуществляются капельные поливы, комбинированная система не может быть развернута.

Анализ причин несоответствия между результатами расчетов и данными физических измерений показал все ту же проблему местных сопротивлений. Действительно, конструкция старт-коннекторов для организации отвода воды к дождевателям в этом опыте осталась та же, и это приводит к потерям напора на местных сопротивлениях, большим, чем это было заложено в модели. Значения коэффициента  $k_{м.с.}$  в этом опыте изменялись от 1,71 при установке двух дождевателей на трубопровод до 1,93 при установке 12 дождевателей на трубопровод. Использование новых конструкций для коннекта дождевателей с поливным капельным трубопроводом позволит решить проблему местных сопротивлений, что даст возможность

получить результаты, численно близкие к модельным значениям. Это позволит использовать комбинированные системы на стандартных модулях капельного орошения с сохранением всей инженерной инфраструктуры, обеспечивающей подвод оросительной воды к поливному участку.

**Выводы.** Таким образом, гидравлические исследования системы комбинированного орошения на уровне поливного модуля показали ряд ограничений ее применения, обусловленных неприемлемым увеличением потерь напора и, как следствие, ростом неравномерности распределения поливной воды по площади орошения. Исследованиями выявлены две основные причины увеличения потерь напора до неприемлемого уровня. Первая, – в целом, ожидаемая – причина состоит в существенном увеличении расхода воды на орошение при совместной работе капельных водовыпусков и дождевателей. Как следствие, увеличивается скорость течения воды в поливном трубопроводе, квадрату которой пропорциональны потери напора по длине и на местных сопротивлениях. Решение этой проблемы состоит в разработке таких конструкций, которые бы позволили во времени разделить поток воды через капельницы и через дождевальные водовыпуски. Расчеты и экспериментальные измерения показывают, что линейные расходы воды через капельные водовыпуски и через микроспринклеры сопоставимы. Поэтому разделенная во времени подача воды в капельницы и в дождеватели позволяет решить проблему повышения скорости течения воды в поливном трубопроводе.

Второй причиной увеличения потерь напора в системах комбинированного орошения является повышение местных сопротивлений в узлах отвода воды к дождевателям. Используемые в настоящем номенклатурные компоненты – старт-коннекторы – в силу своей конструкции в значительной мере перекрывают просвет поливного трубопровода. Это обуславливает существенные дополнительные потери напора, которые тем больше, чем больше дождевателей соединено с трубопроводом. Решение этой пробле-

мы состоит в разработке специальных конструкций отвода воды, которые бы не закрывали просвет трубопровода и характеризовались минимальным местным сопротивлением.

### Список источников

1. Система комбинированного орошения и эффективность производства овощной продукции / Н. Н. Дубенок, А. В. Майер, В. М. Гуренко, С. В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 2(54). С. 253–265. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-31. EDN: UXAJVR.
2. Мелихова Е. В., Бородычев В. В. Моделирование влагопереноса при комбинированном орошении с использованием дифференциального уравнения Пуассона // Мелиорация и водное хозяйство. 2017. № 2. С. 16–19. EDN: YMXWFN.
3. Храбров М. Ю., Майер А. В. Системы комбинированного орошения для садовых и пропашных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 110–118. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-12. EDN: DJTYRI.
4. Лытов М. Н. Агробиологическая эффективность комбинированного орошения сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье // Аграрная Россия. 2022. № 10. С. 3–7. DOI: 10.30906/1999-5636-2022-10-3-7. EDN: RKOZAL.
5. Повышение эффективности комбинированных способов орошения / А. С. Овчинников, М. Ю. Храбров, Н. Г. Колесова, С. В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 231–241. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-31. EDN: IAMRJW.
6. Лытов М. Н. Модель гидромелиоративной системы с функцией защиты сельскохозяйственных посевов от климатических рисков // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 4. С. 40–61. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1397> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-40-61. EDN: BVQLLJ.
7. Дубенок Н. Н., Майер А. В. Многолетние исследования гидротермического режима агроценозов и системы комбинированного орошения для его регулирования // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 2. С. 3–7. DOI: 10.31857/S2500262722020016. EDN: FZVSGD.
8. Новиков А. Е., Ламскова М. И. Исследование потерь напора и равномерности расхода жидкостей в капельных трубопроводах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2(34). С. 89–95. EDN: SFFLAZ.
9. Гидравлический расчет лент системы капельного орошения / А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, В. А. Моторин, В. В. Некрасова // Природообустройство. 2014. № 2. С. 29–33. EDN: QJKXZJ.
10. Математическое моделирование движения жидкости в поливных и участковых трубопроводах систем капельного орошения / А. К. Семерджян, В. И. Орехова, Л. Н. Кондратенко, К. В. Мельник, Д. В. Чичкин // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 4. С. 7–10. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-7-10. EDN: USTWWZ.
11. Лытов М. Н. К определению количественных параметров гидравлической модели систем комбинированного орошения на основе алгоритмизации компьютерных вычислений // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 1. С. 129–146. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1182> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-1-129-146. EDN: TOCIDG.
12. Gherciuc I., Coşuleanu T. Metodica calculării hidraulice a țevilor de udare în

sistemele de irigare prin picurare // Stiinta Agricola. 2010. № 2. P. 78–82. EDN: PWLYWZ. (In Romanian).

13. Моделирование движения жидкостей в капельных трубопроводах по результатам натурных исследований / А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, Л. В. Самофалова, М. И. Филимонов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 1(21). С. 21–34. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1060> (дата обращения: 01.03.2024). EDN: VQUGFB.

14. Hydraulic calculation lateral in drip irrigation / D. Abduraimova, M. Otakhonov, S. Jalilov, U. Vokhidova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1112, № 1. 012132. DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012132. EDN: DDXRST.

## References

1. Dubenok N.N., Mayer A.V., Gurenko V.M., Borodychev S.V., 2019. *Sistema kombinirovannogo orosheniya i effektivnost' proizvodstva ovoshchnoy produktsii* [Combined irrigation system and efficiency of vegetable production]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(54), pp. 253-265, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-31, EDN: UXAJVR. (In Russian).

2. Melikhova E.V., Borodychev V.V., 2017. *Modelirovanie vlagoperenosa pri kombinirovannom oroshenii s ispol'zovaniem differentsial'nogo uravneniya Puassona* [Modeling of moisture transfer under combined irrigation using the Poisson differential equation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 16-19, EDN: YMXWFN. (In Russian).

3. Khrabrov M.Yu., Mayer A.V., 2023. *Sistemy kombinirovannogo orosheniya dlya sadovykh i propashnykh kul'tur* [Combined irrigation systems for horticultural and row crops]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(70), pp. 110-118, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-12, EDN: DJTYRI. (In Russian).

4. Lytov M.N., 2022. *Agrobiologicheskaya effektivnost' kombinirovannogo orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Nizhnem Povolzh'e* [Agrobiological efficiency of combined irrigation of agricultural crops in the Lower Volga region]. *Agrarnaya Rossiya* [Agrarian Russia], no. 10, pp. 3-7, DOI: 10.30906/1999-5636-2022-10-3-7, EDN: RKOZAL. (In Russian).

5. Ovchinnikov A.S., Khrabrov M.Yu., Kolesova N.G., Borodychev S.V., 2019. *Povyshenie effektivnosti kombinirovannykh sposobov orosheniya* [Increasing the efficiency of combined irrigation methods]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 1(53), pp. 231-241, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-31, EDN: IAMR JW. (In Russian).

6. Lytov M.N., 2023. [Model of a water reclamation system with the function of agricultural crop protection from climate risks]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 4, pp. 40-61, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1397> [accessed 01.03.2024], DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-40-61, EDN: BVQLLJ. (In Russian).

7. Dubenok N.N., Mayer A.V., 2022. *Mnogoletnie issledovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrotsenozov i sistemy kombinirovannogo orosheniya dlya yego regulirovaniya* [Long-term studies of the hydrothermal regime of agrocenoses and combined irrigation systems for its regulation]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka* [Russian Agricultural Science], no. 2, pp. 3-7, DOI: 10.31857/S2500262722020016, EDN: FZVSGD. (In Russian).

8. Novikov A.E., Lamskova M.I., 2014. *Issledovanie poter' napora i ravnomernosti raskhoda zhidkostey v kapel'nykh truboprovodakh* [Study of pressure losses and uniformity of liquid flow in drip pipeline]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka*

*i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(34), pp. 89-95, EDN: SFFLAZ. (In Russian).

9. Novikov A.E., Lamskova M.I., Motorin V.A., Nekrasova V.V., 2014. *Gidravlicheskiy raschet polivnykh truboprovodov sistem kapelnogo orosheniya* [Hydraulic calculation for irrigation pipes of drip irrigation systems]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 29-33, EDN: QJKXZJ. (In Russian).

10. Semerdzhyan A.K., Orekhova V.I., Kondratenko L.N., Melnik K.V., Chichkin D.V., 2023. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya zhidkosti v polivnykh i uchastkovykh truboprovodakh sistem kapelnogo orosheniya* [Mathematical modeling of fluid motion in irrigation and district pipes of drip irrigation systems]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4, pp. 7-10, DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-7-10, EDN: USTWWZ. (In Russian).

11. Lytov M.N., 2021. [Determining the quantitative parameters of the hydraulic model of combined irrigation systems based on the computer calculations algorithmization]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, vol. 11, no. 1, pp. 129-146, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1182> [accessed 01.03.2024], DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-1-129-146, EDN: TOCIDG. (In Russian).

12. Gherciuc I., Coşuleanu T., 2010. *Metodica calculării hidraulice a țevilor de udare în sistemele de irigare prin picurare* [Hydraulic calculation method of the irrigation pipelines in drip irrigation systems]. *Știința Agricolă* [Agricultural Science], no. 2, pp. 78-82, EDN: PWLYWZ. (In Romanian).

13. Novikov A.E., Lamskova M.I., Samofalova L.V., Filimonov M.I., 2016. [Simulating fluid movement in drip pipelines based on the field study results]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(21), pp. 21-34, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1060> [accessed 01.03.2024], EDN: VQUGFB. (In Russian).

14. Abduraimova D., Otakhonov M., Jalilov S., Vokhidova U., 2022. Hydraulic calculation of lateral in drip irrigation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1112, no. 1, 012132, DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012132, EDN: DDXRST.

---

#### ***Информация об авторе***

**М. Н. Лытов** – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация, [LytovMN@yandex.ru](mailto:LytovMN@yandex.ru), AuthorID: 372113, ORCID ID: 0000-0003-2743-9825.

#### ***Information about the author***

**M. N. Lytov** – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation, [LytovMN@yandex.ru](mailto:LytovMN@yandex.ru), AuthorID: 372113, ORCID ID: 0000-0003-2743-9825.

*Автор несет ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.  
The author is responsible for violation of scientific publication ethics.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 19.02.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2024; принята к публикации 26.03.2024.*

*The article was submitted 19.02.2024; approved after reviewing 26.03.2024; accepted for publication 26.03.2024.*