

УДК 612.36:51:616.995.122

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ БОЛЬШОГО СОСОЧКА ДПК**С.В.Онищенко****MATHEMATICAL MODEL OF THE WORK OF A MAJOR DUODENAL PAPILLA****S.V.Onishchenko***Медицинский институт Сургутского государственного университета, sergej-on@mail.ru*

Математически описана работа большого сосочка двенадцатиперстной кишки с использованием основных принципов гидродинамики. Исследование является экспериментальным, выполнено на 35 половозрелых кроликах среднешёрстной породы. Описторхозный папиллит, наблюдавшийся у кроликов в течение 12 месяцев, привел к достоверному сужению внутреннего просвета большого сосочка двенадцатиперстной кишки с $2,86 \pm 0,11$ мм до $2,14 \pm 0,15$ мм ($P = 0,000$). Выявлено отсутствие соответствий опытных значений дебита сосочка с данными, рассчитанными по формулам Бернулли ($P = 0,000$) и Пуазейля ($P = 0,000$). В случае с формулой Дарси совпадение данных ($P = 0,906$) наблюдалось при использовании коэффициента просветности, характеризующего суммарный просвет поровых пространств дуоденального сосочка. Подчинение тока жидкости в дуоденальном сосочке закону Дарси полностью подтверждает факт наличия в сосочке порового пространства и позволяет называть перемещение жидкости по нему просачиванием или фильтрацией.

Ключевые слова: *большой сосочек двенадцатиперстной кишки, описторхозный папиллит, стеноз сосочка, закон Дарси, щелевидные пространства, фильтрация желчи*

The aim of our research is to describe the work of a major duodenal papilla mathematically using the basic principles of hydrodynamics. This experimental research is performed on 35 sexually matured rabbits of medium wool breed. Opisthorchosis papillitis observed in rabbits for 12 months, has led to a significant narrowing of the internal lumen of the major duodenal papilla from 2.86 ± 0.11 mm to 2.14 ± 0.15 mm ($P = 0.000$). The absence of flow rate matches of the experimental output values of the papilla with the data calculated by the formulas of Bernoulli ($P = 0.000$) and Poiseuille ($P = 0.000$) was detected. If used the Darcy formula, the data matches ($P = 0.906$) were observed when using the luminal index which characterizes the total clearance of duodenal papilla's pore spaces. The fluid flow's compliance to the Darcy's law completely proves the existence of pore spaces in the papilla, and the fluid flow therein is defined as leakage or filtration.

Keywords: *major duodenal papilla, opisthorchosis papillitis, papillary stenosis, Darcy's law, slit-like spaces, bile filtration*

Введение

Попытки описать работу большого сосочка двенадцатиперстной кишки (БСДК) с математической точки зрения предпринимались и ранее. Принято считать, что фатеров сосок сужен, если зонд диаметром в 3 мм не проходил через него в двенадцатиперстную кишку. При этом просвет сосочка часто воспринимался как просвет круглой трубки с диаметром около 3 мм. Поэтому, как правило, при математическом описании процесса желчеоттока использовались формулы Бернулли и Пуазейля [1,2].

Но даже при сужении сосочка до 1 мм и одномоментном выбросе большой порции желчи из желчного пузыря, давление в общем желчном протоке повышалось всего на 2,14 см вод. ст. [2]. Это говорит о том, что реальные размеры просвета БСДК в естественных условиях совсем иные, нежели измеренные посредством введения в его просвет зонда. Наше предположение состоит в том, что широкого открытия и зияния просвета БСДК в спокойных физиологических условиях вообще не происходит. На это указывает и тот факт, что при отсутствии стеноза сосочка мелкие инородные включения в желчи диаметром до 1 мм (мелкие конкременты, описторхозный детрит) могут вызывать полную обтурацию устья желчных протоков. По нашим предположениям, желчь как бы фильтруется (просачивается) через щелевидные пространства слизистой оболочки канала фатерова соска, суммарная площадь просвета которых может составлять менее 1,0 мм².

Настоящая работа посвящена поиску математической формулы, способной описать механизм протекания желчи по фатерову соску. В зависимости от того, каким образом желчь поступает в ДПК через сосочки, а именно, путем протекания через зияющее отверстие или методом просачивания через щелевидные пространства слизистой оболочки, формулы, описывающие данные процессы, будут различны. Сравнивая данные, полученные опытным путем (дебит), с расчетными, нужно определить формулу, подходящую для математического выражения процесса желчеоттока и, соответственно, можно будет сделать вывод о механизме протекания желчи через БСДК.

Материал и методы

Исследования проводились на 35 половозрелых кроликах обоего пола среднешерстной породы. Описторхоз является естественным патологическим состоянием, для которого характерно наличие в желчи макро- и микровключений (описторхозного детрита) в сочетании с прогрессивным ухудшением (на фоне стенозирования) проходимости БСДК. Заражение животных производилось путем введения взвеси метацеркариев в желудок кролика через желудочный зонд [4,5]. После инвазирования животных изменения в дуоденальном сосочке фиксировались в

остром опыте в различные сроки наблюдения — через 1, 2, 3, 6, 9 и 12 месяцев; контрольную группу составили 5 интактных животных. После лапаротомии и холецистэктомии холангиомано- и дебитометрию осуществляли по методике, описанной в монографии С.А.Шалимова [6]. Измерялось исходное внутрипротоковое давление, давление открытия сфинктера сосочка ДПК и трехкратно (с интервалом в 1 минуту) — остаточное давление в желчных протоках. Дебит изотонического раствора изучали под давлением в 2,45 кПа (250 мм вод. ст.). Внутренний диаметр сосочка определяли традиционным способом, с помощью зонда.

При выборе математической модели работы БСДК мы предполагали существование вместо прямолинейного канала БСДК комплекса извилистых щелей, образованных складками слизистой оболочки, через которые просачивается желчь. Под фильтрацией принято считать движение (просачивание) жидкости через среду, имеющую пустоты (поры, трещины) [3]. Подобный вид протекания жидкости в гидродинамике описывается законом Дарси. Для его реализации необходимо, во-первых, наличие пористой среды с достаточно узкими поровыми каналами и, во-вторых, скорость фильтрации должна быть низкой. Поскольку в силу крайней медленности процесса переноса вещества движение является безынерционным, характеризуя инерционные свойства жидкости, её плотность может быть проигнорирована [7]. Зависимость указанных функций будет иметь линейный характер, а формула линейного закона фильтрации Дарси следующий вид:

$$v_{\phi} = \frac{Q}{S} = -\frac{k}{\eta} \frac{\Delta P}{\Delta l}, \quad (1)$$

где v_{ϕ} — скорость фильтрации (м/с), Q — дебит (м³/с), S — суммарная площадь всех щелей (м²), k — коэффициент проницаемости среды (м²), η — динамическая вязкость (кг/мс), ΔP — перепад давления на участке длиной l (Па).

Формулу Дарси (1) можно записать в ином виде:

$$Q = \frac{k}{\eta} \rho g \frac{P}{l} S, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости (кг/м³), g — ускорение свободного падения (м/с²).

В (1) и (2) коэффициент проницаемости k является физической характеристикой фильтрационных свойств пористой среды и имеет размерность площади (м²):

$$k = \frac{S^4}{2\pi N(1-S)^2}, \quad (3)$$

здесь S — суммарная площадь всех щелей (м²), N — число щелей (пор) [8,9]. Коэффициент определяет пропускную способность среды при фильтрации вязкой жидкости без учета ее плотности при низкой скорости фильтрации и выражается в Дарси (1Д = 1,02 · 10⁻¹² м² ≈ 1 мкм²) [10].

Фильтрационное течение является частным случаем так называемого ползущего движения, для которого характерно преобладание вязких сил над инерционными. Для определения характера течения жидкости существует безразмерная величина, называемая числом Рейнольдса (Re) [11]. Физический смысл числа Рейнольдса состоит в отношении сил инерции к силам вязкости. Для каждого вида течения существует критическое число Рейнольдса ($Re_{кр}$), которое определяет переход от ламинарного течения к турбулентному. Число Рейнольдса течения, подчиняющегося закону Дарси, очень мало и рассчитать его можно по формуле Щелкачева [12]:

$$Re = \frac{10}{S^{2,3}} \left(\frac{v_{\phi} \rho \sqrt{k}}{\eta} \right) = 1 \div 12, \quad (4)$$

S — суммарная площадь щелей (m^2), v_{ϕ} — скорость фильтрации (m/c), ρ — плотность жидкости (kg/m^3), k — коэффициент проницаемости среды (m^2), η — динамическая вязкость (kg/mc).

Из формулы (4) можно определить предельную (критическую) скорость фильтрации ($v_{\phi \text{ кр}}$), при которой выполняется указанное равенство (т.е. еще справедлив закон Дарси). Если значения Re превысят $Re_{кр}$, линейный закон Дарси перестанет выполняться, а расчетная формула примет другой вид, но и в этом случае нарушения ламинарного характера потока жидкости не произойдет [13].

Работы отечественных и зарубежных исследователей [14] посвящены изучению условий, при которых происходит отклонение процесса фильтрации от линейного закона Дарси. При превышении реальной скорости перемещения жидкости (v_{ϕ}) критического значения ($v_{\phi \text{ кр}}$) (или $Re > Re_{кр}$) линейный закон Дарси перестаёт выполняться, а вместо него становится справедливым нелинейный (квадратичный) закон фильтрации [13]:

$$v_{\phi} + bv_{\phi}^2 = \frac{Q}{S} = -\frac{k}{\eta} \frac{\Delta P}{\Delta l}, \quad (5)$$

лучше описываемый формулой такого рода:

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = av_{\phi} + bv_{\phi}^2. \quad (6)$$

Здесь в (5) и (6) a и b — параметры, характерные для данного флюида и пористой среды соответственно, Q — объемный расход жидкости (m^3/c).

Обоснованием использования квадратичного (двучленного) закона фильтрации служат следующие доводы. Одной из возможных причин невыполнения линейного закона фильтрации может быть игнорирование инерционных сил в формулах (1) и (2). Сила давления, действующая на жидкость при прохождении участка пористой среды, необходима для преодоления как сил внутреннего трения, что зависит от вязкости жидкости, так и инерционных сил, зависящих от плотности вещества [13], т. е.:

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{\Delta P_{\eta}}{\Delta l} + \frac{\Delta P_{\rho}}{\Delta l}, \quad (7)$$

где $\Delta P_{\eta}/\Delta l$ — величина градиента давления, необходимого для преодоления сил трения вязкой жидкости;

$\Delta P_{\rho}/\Delta l$ — величина градиента давления, необходимого для преодоления инерционного сопротивления. Величина $\Delta P_{\eta}/\Delta l$ определяется из закона Дарси:

$$\frac{\Delta P_{\eta}}{\Delta l} = \frac{\eta}{k} v_{\phi}, \quad (8)$$

соответственно, градиент $\Delta P_{\rho}/\Delta l$ равняется:

$$\frac{\Delta P_{\rho}}{\Delta l} = \frac{\rho}{k'} v_{\phi}^2, \quad (9)$$

где k' (коэффициент проницаемости среды) имеет размерность длины (m) и равняется:

$$k' = \frac{S^3}{2\pi N(1-S)^2}. \quad (10)$$

Физико-математическое обоснование (9) и (10) взято из учебного пособия Пыхачева и Исаева «Подземная гидродинамика» [13, с.32-33].

Подставив (8) и (9) в формулу (7) получим:

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{\eta}{k} v_{\phi} + \frac{\rho}{k'} v_{\phi}^2, \quad (11)$$

а сравнив (6) и (11), выясним, что:

$$a = \frac{\eta}{k}; \quad b = \frac{\rho}{k'}. \quad (12)$$

Из формулы (11) видно, что зависимость энергии, необходимой для преодоления вязкостных сил (пропорционально коэффициенту вязкости и скорости фильтрации), является прямолинейной, а для преодоления инерционных сил (пропорционально плотности жидкости и квадрату скорости) — квадратичной, при этом вместо одного коэффициента проницаемости используется два: k — для вязкой жидкости и k' — для инерционной. Учитывая, что $Q = v_{\phi} S$, из (11) получим:

$$Q = \frac{-\frac{\eta}{k} \pm \sqrt{\left(\frac{\eta}{k}\right)^2 + 4 \frac{\rho}{k'} \frac{\Delta P}{\Delta l}}}{2 \frac{\rho}{k'}} S. \quad (13)$$

Из двух результатов квадратичного уравнения (13) один, исходя из разумности полученных цифр, будет соответствовать количеству фильтрующейся жидкости (Q).

Для объективной оценки и сравнения итоговых данных был также рассчитан дебит по трубе круглого сечения (как зачастую представляется просвет БСДК), при этом использовались значения диаметров сосочка, определенных зондовым методом. Наиболее подходящей формулой для жидкости с низкой вязкостью, протекающей с постоянной скоростью по трубе круглого сечения, является формула Бернулли [15]:

$$Q = \pi R^2 \sqrt{2(P + \rho gh)}, \quad (14)$$

где Q — дебит (m^3/c), R — радиус выходного отверстия трубки (m), P — давление, действующее на жидкость в системе (Pa), ρ — плотность жидкости (kg/m^3), g — ускорение свободного падения ($9,8 m/c^2$), h — длина трубки (m).

Расход вязкой жидкости в трубе описывается формулой Пуазейля [16]:

$$Q = \frac{\pi(P + \rho gh)}{8\eta h} R^4, \quad (15)$$

где Q — дебит ($\text{м}^3/\text{с}$), R — радиус выходного отверстия трубки (м), P — давление, действующее на жидкость в системе (Па), ρ — плотность жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$), g — ускорение свободного падения ($9,8 \text{ м}/\text{с}^2$), η — динамическая вязкость жидкости ($\text{кг}/\text{мс}$), h — длина трубки (м).

Правомочность использования (14) и (15) проверялась величиной числа Рейнольдса, для круглых труб она должно быть ≤ 1000 , при этом использовалась формула:

$$Re = \frac{2Rv\rho}{\eta}, \quad (16)$$

где R — текущий радиус (м), v — скорость течения жидкости ($\text{м}/\text{с}$), ρ — плотность жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$), η — динамическая вязкость жидкости ($\text{кг}/\text{мс}$) [17].

Таким образом, просчитав указанные варианты и сравнив их значения с реальными, полученными в опыте, можно проверить, применим ли закон Дарси для описания механизм протекания жидкости по дуоденальному сосочку при данных условиях.

Результаты

На фоне описторхозного поражения дуоденального сосочка животных в результате его продуктивного воспаления [18] отмечено прогрессирующее уменьшение его просвета (табл.1).

Таблица 1
Показатели внутреннего диаметра
дуоденального сосочка животных ($\bar{X} \pm \sigma$)

Месяц (группа)	d (мм)	d (м)
Исх. (контр.)	2,86 $\pm 0,11$	0,00286 $\pm 0,00011$
1 (I)	2,84 $\pm 0,13$	0,00284 $\pm 0,00013$
2 (II)	2,80 $\pm 0,16$	0,00280 $\pm 0,00016$
3 (III)	2,74 $\pm 0,18$	0,00274 $\pm 0,00018$
6 (IV)	2,54 $\pm 0,15$	0,00254 $\pm 0,00015$
9 (V)	2,32 $\pm 0,22$	0,00232 $\pm 0,00022$
12 (VI)	2,14 $\pm 0,15$	0,00214 $\pm 0,00015$

В группе интактных животных средние показатели внутреннего диаметра сосочка составляли $2,86 \pm 0,11$ мм, к концу исследования — $2,14 \pm 0,15$ мм; ($t = 8,485 > t_{(\alpha=0,05)} = 2,306$, $P = 0,000$).

В табл.2 представлены данные исходного давления, давления открытия сфинктера сосочка и остаточное давление в желчных протоках после сброса жидкости у кроликов контрольной группы и в динамике на фоне прогрессирующих явлений описторхозного папиллита, приведены данные статистического анализа.

Таблица 2
Данные манометрии желчных путей кроликов
($\bar{X} \pm \sigma$, q^* , $q^*_{(\alpha=0,05)}$, P)

Месяц (группа)	Исходное давление (мм вод. ст.; кПа)	Давление открытия (мм вод. ст.; кПа)	Остаточное давление (мм вод. ст.; кПа)
Исх. (контр.)	7,4 $\pm 2,79$; 0,07 $\pm 0,03$	65,6 $\pm 14,94$ 0,64 $\pm 0,15$	40,5 $\pm 7,02$ 0,40 $\pm 0,07$
1 (I)	14,0 $\pm 4,69$ 0,14 $\pm 0,05$ $q^* = 2,824 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,027$	113,0 $\pm 21,33$ 1,11 $\pm 0,21$ $q^* = 4,159 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,004$	64,0 $\pm 8,41$ 0,63 $\pm 0,08$ $q^* = 2,919 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,001$
2 (II)	19,6 $\pm 3,21$ 0,19 $\pm 0,03$ $q^* = 5,220 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	156,8 $\pm 11,78$ 1,54 $\pm 0,12$ $q^* = 8,049 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	101,4 $\pm 10,68$ 0,99 $\pm 0,10$ $q^* = 7,590 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$
3 (III)	29,0 $\pm 6,32$ 0,28 $\pm 0,06$ $q^* = 8,899 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	182,4 $\pm 20,13$ 1,79 $\pm 0,20$ $q^* = 10,299 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	147,1 $\pm 10,32$ 1,44 $\pm 0,10$ $q^* = 13,301 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$
6 (IV)	34,8 $\pm 2,39$ 0,34 $\pm 0,02$ $q^* = 11,295 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	218,0 $\pm 11,22$ 2,14 $\pm 0,11$ $q^* = 13,450 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	188,1 $\pm 11,8$ 1,84 $\pm 0,12$ $q^* = 18,403 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$
9 (V)	40,4 $\pm 2,70$ 0,40 $\pm 0,03$ $q^* = 13,691 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	243,6 $\pm 25,22$ 2,39 $\pm 0,25$ $q^* = 15,701 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	205,5 $\pm 20,51$ 2,01 $\pm 0,20$ $q^* = 20,510 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$
12 (VI)	45,4 $\pm 2,70$ 0,45 $\pm 0,03$ $q^* = 15,830 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	264,0 $\pm 15,95$ 2,59 $\pm 0,16$ $q^* = 17,502 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$	242,9 $\pm 15,46$ 2,38 $\pm 0,15$ $q^* = 25,206 >$ $q^*_{(0,05)} = 2,72$, $P = 0,000$

* апостериорные сравнения выполнялись методом Даннета, в качестве контрольных значений использовались данные интактной (контрольной) группы животных, выраженных в мм вод. ст.

Как видно, имело место прогрессирующее нарастание исходного давления в протоках на фоне инвазии, с $7,4 \pm 2,79$ мм вод. ст. в начале эксперимента до $45,4 \pm 2,70$ мм вод. ст. к концу опыта ($P = 0,000$), что можно интерпретировать как развитие хронической желчной гипертензии, характерной для описторхоза. Постоянный рост давления, необходимого для открытия сфинктера дуоденального сосочка (с $65,6 \pm 14,94$ до $264,0 \pm 15,95$ мм вод. ст., $P = 0,000$), может свидетельствовать и о компенсаторном повышении тонуса сфинктера сосочка, и о развивающемся фиброзе и склерозе последнего, приводящих к его ригидности. Описторхозное поражение протоков, в частности сужение просвета сосочка, способствует также нарушению опорожнения желчных путей, что находит отражение в повышении остаточного давления в них (с $40,5 \pm 7,02$ до $242,9 \pm 15,46$ мм вод. ст., $P = 0,000$) после физиологического открытия сфинктера.

В табл.3 представлены дебитометрические данные.

Таблица 3

Данные дебитометрии желчных путей кроликов
($\bar{X} \pm \sigma$, $\chi^2_{(кр*)}$, P)

Месяц (группа)	Дебит физиологического р-ра (мл/мин; $\text{м}^3/\text{с}$; $\chi^2_{(\alpha=0,05)}$, P)
Исх. (контр.)	$16,50 \pm 2,35$ $0,28 \times 10^{-6} \pm 0,04 \times 10^{-6}$
1 (I)	$16,0 \pm 1,7$ $0,27 \times 10^{-6} \pm 0,03 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,517 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,472$
2 (II)	$14,9 \pm 1,08$ $0,25 \times 10^{-6} \pm 0,02 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,798 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,372$
3 (III)	$13,4 \pm 0,89$ $0,22 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,678 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,410$
6 (IV)	$9,1 \pm 1,08$ $0,15 \times 10^{-6} \pm 0,02 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,358 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,550$
9 (V)	$5,7 \pm 0,64$ $0,10 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,842 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,359$
12 (VI)	$4,7 \pm 0,31$ $0,08 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$ $\chi^2=0,858 < \chi^2_{(кр)}=7,257$, $P=0,354$

* сравнения с контрольной группой производились с учетом поправки Бонферрони.

Как видно, дебитометрические показатели обратно пропорциональны результатам манометрии. Пропускная способность дуоденального сосочка на фоне описторхозного папиллита прогрессивно ухудшалась: показатели дебита составляли $16,5 \pm 2,35$ мл/мин в исходной группе и $4,7 \pm 0,31$ мл/мин к 12-му месяцу инвазии. Однако статистический анализ дебитометрических показателей, в отличие от манометрических, не подтвердил значимость разницы показателей ни в одной из пар сравнения. Таким образом, прогрессирующее (статистически значимое, но измеренное традиционным способом) сужение просвета дуоденального сосочка животных на фоне развития описторхоза и соответствующее этому повышение давления в протоках не привели к существенному изменению дебита физиологического раствора.

Обсуждение

Используя (4) и (16), мы подтвердили необходимость и правомочность использования при расчетах дебита квадратичной формулы Дарси (13) и формул Бернулли (14) и Пуазейля (15). Значения чисел Рейнольдса представлены в табл.4.

Таблица 4
Значения числа Re в зависимости от диаметра канала

Диаметр сосочка, измеренный зондом, D (мм; м)	Re (для пористых сред)	Re (для труб)
$2,14 \pm 0,15$; $0,0021 \pm 0,00015$	6,4	160,8
$2,32 \pm 0,22$; $0,0023 \pm 0,00022$	11,7	174,3
$2,54 \pm 0,15$; $0,0025 \pm 0,00015$	22,8	190,8
$2,74 \pm 0,18$; $0,0027 \pm 0,00018$	40,0	205,8
$2,80 \pm 0,16$; $0,0028 \pm 0,00016$	47,0	210,3
$2,84 \pm 0,13$; $0,0028 \pm 0,00013$	52,2	213,4
$2,86 \pm 0,11$; $0,0029 \pm 0,00011$	55,3	214,9

Рассчитав дебит по вышеприведенным формулам и сравнив результаты с опытными данными, мы ни в одном случае не получили даже приблизительного соответствия итоговых значений ($P = 0,000$).

Проанализировав ситуацию, мы пришли к выводу, что значения S в (13) в принципе были выбраны неверно. Число, выражающее суммарную площадь всех щелей, вначале было определено нами как площадь отверстия канала сосочка с диаметром, измеренным традиционным способом, по формуле $S = \pi r^2$, по сути, это площадь круглого отверстия без всяких щелей и пор. Поскольку мы пытаемся доказать предположение, что конечный отдел сосочка состоит из системы каналов и пор, образованной складками слизистой, а значит, часть просвета должна быть занята неким каркасом (перемычками), исправляя ошибку, в формулу Дарси (13) мы ввели коэффициент просветности ($n_{пр}$), который выражается отношением площади проходов в поперечном сечении пористой среды ($S_{пр}$) ко всей площади (S) этого сечения [19]. Коэффициент просветности ($n_{пр}$) может принимать значения от минимально отличных от нуля до стремящихся к 1, мы остановились на его среднем варианте — 0,5 (половина просвета занята каркасом, половина — щелями и порами). Применив коэффициент просветности ($n_{пр}$), мы заменили S на $S_{пр}$, (13) приняла вид:

$$Q'_2 = \frac{-\frac{\eta}{k} \pm \sqrt{\left(\frac{\eta}{k}\right)^2 + 4 \frac{\rho}{k'} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l}}}{2 \frac{\rho}{k'}} \cdot S \cdot n_{пр}, \quad (17)$$

где $n_{пр}$ — коэффициент просветности, равный 0,5.

Необходимость учета коэффициента просветности ярко демонстрирует верность нашей идеи существования порового пространства в конце дуоденального сосочка и возможности фильтрационного способа попадания желчи в просвет ДПК. Уменьшение реальной площади пропускного сечения в 2 раза привело к незначительному изменению значений числа Рейнольдса (Re), при этом было получено ожидаемое снижение расчетных показателей дебита. В табл.5 представлены данные дебита физиологического раствора по сосочку и результаты, рассчитанные по квадратичной формуле Дарси с учетом коррекции суммарной площади просветов.

Таблица 5

Опытные данные *in vivo* и рассчитанные по квадратичной формуле Дарси ($\bar{X} \pm \sigma$)

Диаметр сосочка, D (мм; м)	Опыт (<i>in vivo</i>), Q (мл/мин; м ³ /с)	Формула Дарси-кв., Q (мл/мин; м ³ /с)	Статистика различий* ($\chi^2, \chi^2_{(0,05)}, P$)
$2,14 \pm 0,15$; $0,0021 \pm 0,00015$	$4,7 \pm 0,3$; $0,08 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$	3,87; $0,06 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,178 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,673$
$2,32 \pm 0,22$; $0,0023 \pm 0,00022$	$5,7 \pm 0,6$; $0,10 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$	5,93; $0,10 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,009 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,925$
$2,54 \pm 0,15$; $0,0025 \pm 0,00015$	$9,1 \pm 1,1$; $0,15 \times 10^{-6} \pm 0,2 \times 10^{-6}$	9,50; $0,16 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,017 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,897$
$2,74 \pm 0,18$; $0,0027 \pm 0,00018$	$13,4 \pm 0,9$; $0,20 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$	14,01; $0,23 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,027 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,870$
$2,8 \pm 0,16$; $0,0028 \pm 0,00016$	$14,9 \pm 1,1$; $0,25 \times 10^{-6} \pm 0,02 \times 10^{-6}$	15,64; $0,26 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,035 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,852$
$2,84 \pm 0,13$; $0,0028 \pm 0,00013$	$16,0 \pm 1,7$; $0,27 \times 10^{-6} \pm 0,03 \times 10^{-6}$	16,81; $0,28 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,039 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,843$
$2,86 \pm 0,11$; $0,0029 \pm 0,00011$	$16,5 \pm 2,3$; $0,28 \times 10^{-6} \pm 0,04 \times 10^{-6}$	17,43; $0,29 \times 10^{-6}$	$\chi^2 = 0,050 < \chi^2_{(0,05)} = 3,841$, $P = 0,824$

* апостериорные сравнения проводились с данными дебита, выраженными в мл/мин.

В этом случае апостериорные сравнения данных (табл.5) указали на отсутствие статистически значимых различий ($P > 0,05$) между опытными и расчетными данными.

Наглядное доказательство этому представлено на рисунке, где обе кривые располагаются рядом. Учитывая результаты статистического анализа, можно сказать, что $Q_{in vivo}$ равняется $Q_{расч}$ с погрешностью, допустимой для принятия этого факта

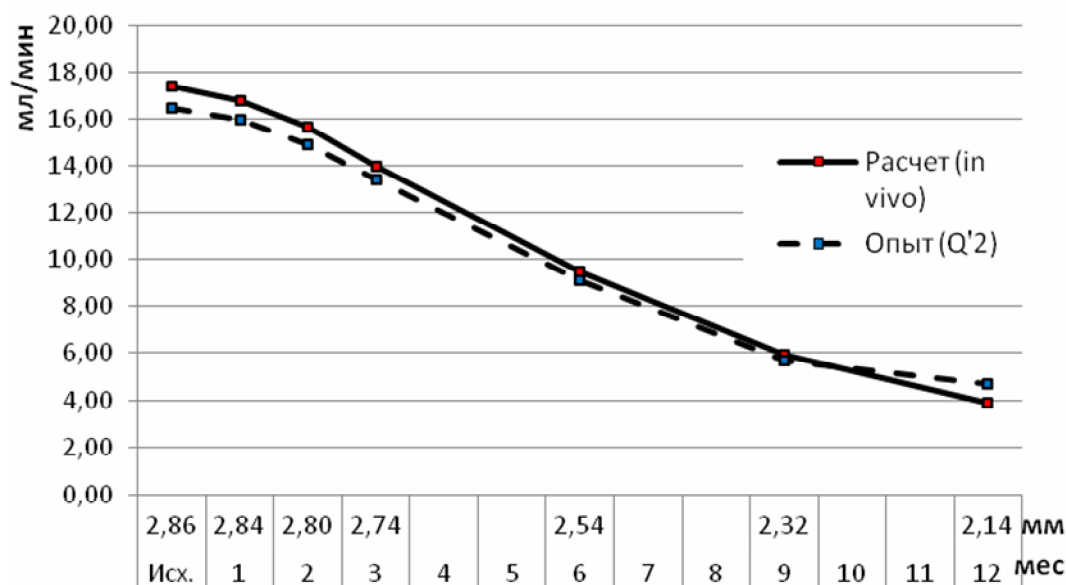
Заключение

Таким образом, в результате наблюдения за инвазированными кроликами в течение 12 месяцев, отмечено достоверное сужение внутреннего просвета дуоденального сосочка с $2,86 \pm 0,11$ мм до $2,14 \pm 0,15$ мм ($P = 0,000$). Следствием сужения просвета сосочка явилось развитие желчной гипертензии, подтвержденное данными манометрии. Ис-

ходное давление в протоках на фоне описторхоза в течение года возросло в 6,4 раза ($P = 0,000$), давление открытия — в 4 раза ($P = 0,000$), остаточное давление — в 6 раз ($P = 0,000$).

Но основной задачей эксперимента на животных являлось изучение дебитометрических показателей сосочка на фоне его прогрессирующего сужения. Однако снижение дебита на начало и конец эксперимента для физиологического раствора с $16,5 \pm 2,35$ мл/мин ($0,28 \times 10^{-6} \pm 0,04 \times 10^{-6}$ м³/с) до $4,7 \pm 0,31$ мл/мин ($0,08 \times 10^{-6} \pm 0,01 \times 10^{-6}$ м³/с) явилось статистически незначимым ($P = 0,576$).

Путем сравнения дебитометрических данных, полученных в опыте с расчетными значениями, вычисленных по формулам, описывающих движение жидкостей по трубам (формулы Бернулли и Пуазейля) и пористым пространствам (линейная и квадратичная формулы Дарси), было получено полное соот-

График дебитометрии сосочка с площадью просвета ($S_{пр}$) и расчетных данных по квадратичной формуле Дарси

ветствие опытных данных дебита сосочка со значениями, рассчитанными по квадратичной формуле Дарси ($P = 0,906$).

Подчинение тока жидкости в БСДК закону Дарси полностью подтверждает факт наличия в сосочке порового пространства, а перемещение жидкости по нему позволяет называть просачиванием или фильтрацией.

В итоге можно заключить, что:

— статистически значимое уменьшение диаметра дуоденального сосочка *in vivo* (измеренного посредством зонда) с $2,86 \pm 0,11$ до $2,14 \pm 0,15$ мм, в 1,3 раза ($P = 0,000$), приводит к статистически значимому повышению показателей давления в желчных протоках: исходного — в 6,1 ($P = 0,000$), открытия — в 4 ($P = 0,000$), остаточного — в 6 раз ($P = 0,000$) и статистически незначимому снижению дебита физиологического раствора — в 3,5 ($P = 0,576$);

— ток жидкости по дуоденальному сосочку подчиняется закону Дарси и описывается одноименным квадратичным уравнением;

— конечный участок дуоденального сосочка представляет собой комплекс щелей и пор, образованных слизистой оболочкой, через которые при определенных условиях фильтруется (просачивается) желчь.

17. Теплов А.В. Основы гидравлики. М.-Л.: Энергия, 1965. 185 с.
18. Зубов Н.А., Зубков В.Г. Гиперпластические изменения большого дуоденального сосочка при описторхозе человека // Архив патологии. 1983. №48 (1). С.34-38.
19. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высшая школа, 1985. 464 с.

References

1. Pikovskii D.L. Vestnik khirurgii im. I.I. Grekova – Surgery bulletin named after I.I. Grekov, 1965, no. 9, p. 64.
2. Petrov B.A., Gal'perin E.I. Khirurgiia vnephechnykh zhelchnykh protokov [Surgery of the extrahepatic bile ducts]. Moscow, "Meditsina" Publ., 1971. 200 p.
3. Landau L.D., Lifshitz E.M. Teoreticheskaya fizika [Course of Theoretical Physics]. Vol. 6. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow, "Fizmatlit" Publ., 2001. 728 p.
4. Glazkov G.A. K metodike vydeleniya metatserkariyev sibirskoi dvuustki iz myshechnoi tkani porazhennoi ryby. Problema opistorkhoza v Zapadnoi Sibiri [On the methods of eliminating the Siberian liver fluke metacercariae from the muscle tissue of affected fish. Problem of opisthorchiasis in Western Siberia]. Leningrad, 1977, pp. 53-54.
5. Glazkov, G.A. Vydelenie trikhodin iz porazhennoi tkani ryb. Bolezni i parazity ryb ledovitomorskoj provintsii (v predekh SSSR) [Elimination of trichodina from the affected tissue of fish. Diseases and parasites of fish of the Arctic province (within the USSR)]. Tomsk, 1979, pp. 80-84.
6. Shalimov S.A. Diagnostika i lechenie zabolevaniy BDS [Diagnosis and treatment of diseases of the major duodenal papilla]. Kiev, Zdorov'ia, 1985. 148 p.
7. Leont'ev N.E. Osnovy teorii fil'tratsii [Fundamentals of filtration theory]. Moscow, Publishing House of the Center for Applied Research in the Mechanics and Mathematics Faculty of MSU, 2009. 88 p.
8. Paffengol'ts K.N., Borovikov L.I., Zhamoida A.I., Krasnov I.I., Krasnyi L.I., Marchenko V.I., Nezhenkii I.A., Osyko T.I., Rundkvist D.V., Shatalov E.T., eds. Geologicheskii slovar' [Geological dictionary]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, "Nedra" Publ., 1978. 487 p.
9. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. Podzemnaia gidromekhanika [Underground hydromechanics]. Moscow, "Nedra" Publ., 1993. 416 p.
10. Korkin V.D., Brodach M.M., eds. Anglo-russkii terminologicheskii slovar' ASHRAE po otopleniiu, ventilatsii, konditsionirovaniu vozdukhа i okhlazhdeniiu [English-Russian dictionary of ASHRAE terminology of heating, ventilation, air conditioning and refrigeration]. Moscow, AVOK-Press, 2002. 240 p.
11. Prokhorov A.M., ed. Bol'shaia sovetskaia entsiklopediia [Great Soviet Encyclopedia]. In 30 vols. Vol. 30. Moscow, "Sovetskaia entsiklopediia" Publ., 1969-1978.
12. Shchelkachev V.N., Lapuk B.B. Podzemnaia gidravlika [Underground hydraulics]. Moscow, "Rostoptekhizdat" Publ., 1949. 525 p.
13. Pykhachev G.B., Isaev R.G. Podzemnaia gidrodinamika [Underground hydrodynamics]. Moscow, "Nedra" Publ., 1972. 360 p.
14. Polubarinova-Kochina I.A. Teoriia dvizheniia gruntovykh vod [The theory of groundwater motion]. Moscow, "Nauka" Publ., 1977. 664 p.
15. Loitsianskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of fluid and gas]. Moscow, "Drofa" Publ., 2003. 842 p.
16. Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V. Vvedenie v mekhaniku sploshnykh sred [Introduction to the mechanics of continuous media]. Moscow, "Nauka" Publ., 1982. 337 p.
17. Teplov A.V. Osnovy gidravliki [Fundamentals of hydraulics]. Moscow, Leningrad, "Energiia" Publ., 1965. 185 p.
18. Zubov N.A., Zubkov V.G. Giperplasticheskie izmeneniia bol'shogo duodenalnogo sosochka pri opistorkhoze cheloveka [Hyperplastic changes of the major duodenal papilla in opisthorchiasis]. Arkhiv patologii – Archive of Pathology, 1983, vol. 48 (1), pp. 34-38.
19. Alekseev B.V., Grishin A.M. Fizicheskaya gazodinamika reagiruiushchikh sred [Physical gas dynamics of reactive media]. Moscow, "Vysshiaia shkola" Publ., 1985. 464 p.

1. Пиковский Д.Л. // Вестник хирургии. 1965. №9. С.64.
2. Петров Б.А., Гальперин Э.И. Хирургия внепеченочных желчных протоков. М.: Медицина, 1971. 200 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие в 10 т. Т. VI: Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001. 736 с.
4. Глазков Г.А. К методике выделения метацеркариев сибирской двуустки из мышечной ткани пораженной рыбы. Проблема описторхоза в Западной Сибири. Л., 1977. С.53-54.
5. Глазков Г.А. Выделение триходин из пораженной ткани рыб. Болезни и паразиты рыб ледовитоморской провинции (в пределах СССР). Томск, 1979. С.80-84.
6. Шалимов С.А. Диагностика и лечение заболеваний БДС. Киев: Здоров'я, 1985. 148 с.
7. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
8. Геологический словарь: в 2-х т. / Под ред. К.Н.Паффенгольца, Л.И.Боровикова, А.И.Жамойды и др. М.: Недра, 1978. Т.1. 487 с.
9. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с.
10. Англо-русский терминологический словарь ASHRAE по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха и охлаждению / Под ред. В.Д.Коркина, М.М.Бродач. М.: АВОК-Пресс, 2002. 240 с.
11. Большая советская энциклопедия: В 30 т. / Под ред. А.М.Прохорова. 3-е изд. М.: Сов. энциклопедия, 1969-1978.
12. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М.: Ростоптехиздат, 1949. 525 с.
13. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидродинамика. М.: Недра, 1972. 360 с.
14. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 842 с.
16. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. М.: Наука, 1982. 337 с.